

625.3

L574

1906

copy

LES

CHEMINS DE FER A CRÉMAILLÈRE

PAR

M. A. LÉVY-LAMBERT

CHAPITRE I

Considérations générales. — Adhérence.

Le développement si considérable des voies ferrées, leur extension qui a dépassé toutes les prévisions possibles et changé les conditions de la vie humaine dans tous les pays civilisés; toutes ces conséquences, si importantes qu'elles puissent être, découlent cependant du simple fait suivant résultant des lois du frottement : pour faire progresser un véhicule sur une route horizontale ordinaire il faut lui appliquer une force dont l'intensité est environ les $3/100$ de son poids; sur une voie ferrée en palier le véhicule se meut sous l'action d'une force égale au aux $3/1\,000$ de son poids et ce à une vitesse quatre fois plus grande.

C'est-à-dire que l'effort à développer pour faire avancer un véhicule sur rails n'est que le $1/10$ de celui qu'il faut exercer pour faire rouler la même charge sur une route si l'on fait abstraction de la résistance de l'air; la vitesse étant quadruple.

Cette conclusion n'est vraie qu'en palier; dès que le profil de la route s'incline, la pesanteur intervient et, qu'il s'agisse de route ou de voie ferrée, à la force précédemment indiquée s'ajoute algébriquement la composante de la gravité : positive en rampe, négative en pente, la valeur de cette composante étant égale approximativement à autant de kilogrammes par tonne du véhicule qu'il y a de millimètres dans la tangente de l'angle de la déclivité.

Ainsi, pour faire rouler un véhicule de 15 t sur rails en palier, il faut développer un effort de 45 kg; mais sur une rampe de 25 mm l'effort supplémentaire dû à la gravité est de $15 \times 25 = 375$ kg; plus de huit fois l'effort en palier.

A cette considération s'en joint une autre pour aggraver l'effet

fâcheux des déclivités; c'est la limitation de l'effort de l'appareil de traction, de la locomotive; nous voulons parler de l'adhérence.

Si la locomotive avance sur le rail, c'est parce que les roues motrices rencontrent plus de résistance à tourner sur place, à patiner, qu'à rouler en cheminant.

Le rapport entre la force nécessaire à la propulsion p et le poids P chargeant les roues motrices est ce que l'on appelle le coefficient d'adhérence $f = \frac{p}{P}$; c'est en réalité le frottement de glissement de fer sur fer, dont la valeur moyenne est d'environ $\frac{1}{7}$. L'effort de traction p est-il supérieur au produit Pf , la machine ne peut plus avancer, les roues tournent sur place, on dit que la machine « patine ».

Cherchons à partir de quel moment une machine remorquant un train est exposée à patiner à la montée d'une rampe.

Soit P le poids du train en tonnes;

a la résistance du train en palier en kilogrammes;

p le poids de la machine à adhérence totale en tonnes;

ω le poids du tender en tonnes;

z la résistance par tonne de la machine et du tender;

i l'inclinaison en millimètres par mètre de la rampe;

f le coefficient d'adhérence.

On aura au moment de la limite d'adhérence :

$$1\,000\,pf = P(a + i) + (p + \omega)(z + i) \quad [1]$$

$$P = \frac{1\,000\,pf - (p + \omega)(z + i)}{a + i}.$$

$$\text{Si } a = 3 \text{ kg} \quad p = 35 \text{ t} \quad \omega = 16 \text{ t} \quad z = 12,5 \quad f = \frac{1}{7}:$$

$$\text{Pour } i = 20 \text{ mm, } P = 145 \text{ t;}$$

$$\text{Pour } i = 50 \text{ mm, } P = 34 \text{ t.}$$

C'est-à-dire que sur une rampe de 50 mm, une machine ordinaire à tender séparé, pesant 51 t avec son tender, ne remorquerait plus que 34 t; pas tout à fait les trois quarts de son poids.

On remarquera que la condition trouvée est indépendante de la vitesse; on ne gagne rien en réduisant la vitesse, c'est le poids adhérent qui fait défaut.

Toutefois, nous avons envisagé ici le cas d'une locomotive à tender séparé; on peut améliorer l'effet utile en employant des machines tender à adhérence totale. Serrons donc la question de plus près, et voyons ce que donne cette solution. Il suffit dans la formule précédente de faire $\omega = 0$ et $P = p$; on en déduit $2i = 1\,000 f - (a + z)$ et $i = \frac{1\,000 f - (a + z)}{2}$; on trouve $i = 62$ mm.

Ainsi, sur une pente de 62 mm une machine-tender à adhérence totale remorquerait à peine un poids égal au sien.

Prenons un cas extrême : celui d'un véhicule automobile.

On a alors $1\,000 pf = p(a + i)$ ou $i = 1\,000 f - a$, d'où $i = 140 - 3 = 137$ mm.

Le coefficient d'adhérence étant sujet à variations, on reste en pratique au-dessous de cette limite. Au tramway de Longemer à Retournemer, les déclivités atteignent 93 mm; aux tramways de Boulogne 120 mm, à Laon 122 mm, toutes lignes exploitées par simple adhérence à l'aide de voitures automobiles électriques.

Il existe toutefois une autre limite arrêtant la propulsion en forte rampe; c'est celle résultant de la légèreté spécifique de la machine.

Cette limite a été indiquée ainsi par Couche (1) :

Soit T le travail disponible par unité de temps sur les roues motrices;

π le poids de la locomotive-tender à adhérence totale;

P le poids du train remorqué;

V la vitesse;

r le coefficient de résistance du train et de la machine correspondant à cette vitesse;

f le coefficient d'adhérence;

On a : $T = (P + \pi) i \times V + (P + \pi) Vr,$

ou : $T = (P + \pi) V(i + r),$

d'où $P + \pi = \frac{T}{V(i + r)},$

et $\frac{P}{\pi} = \frac{T}{V\pi(i + r)} - 1,$

pour $P = \pi; i = \frac{T}{2V\pi} - r.$

(1) COUCHE, tome II, livre III, page 555.

Limite variable pour chaque vitesse; mais ne dépendant que du rapport $\frac{T}{\pi}$ c'est-à-dire du poids par cheval-vapeur disponible; de la légèreté spécifique de l'appareil moteur.

C'est ainsi que l'emploi des locomotives compound a permis à notre éminent collègue M. Mallet d'aborder des pentes plus raides sur les voies ferrées.

Cette limite dépendant de la vitesse et de la légèreté spécifique du moteur, s'applique aux machines à adhérence comme aux machines à crémaillère; elle est générale pour tous les locomoteurs se touant eux-mêmes par leur propre force.

Mais cette limite étant la seule applicable aux machines à crémaillère, on peut aller jusqu'à cette limite et par conséquent en diminuant la vitesse V , le travail T restant fixe, l'effort de traction d'une machine à crémaillère peut être augmenté au détriment de la vitesse; pour les machines à adhérence, au contraire, au delà d'une certaine limite on ne gagne rien à réduire la vitesse, parce que l'on est limité non plus seulement par la condition de légèreté spécifique, mais surtout par la nécessité de ne pas exposer la machine à patiner condition qui se traduit par l'inégalité $f\pi > \frac{T}{V}$.

Ainsi, en réduisant la vitesse, la force de traction des machines à crémaillère n'est limitée que par leur légèreté spécifique, tandis qu'en sus de cette condition les machines à adhérence ont leur effort de traction limité par le patinage.

Le tableau ci-dessous indique les valeurs des charges trainées en service courant par des locomotives à adhérence de divers types.

Comme nous l'avons dit plus haut, en réduisant la vitesse sur les lignes à adhérence, on ne gagne rien au delà d'une certaine limite, parce que l'adhérence fait défaut; sur les lignes à crémaillère, au contraire, en réduisant la vitesse on remorque des charges plus fortes et l'on aborde des rampes plus raides.

C'est ainsi que, par exemple, les machines à crémaillère du chemin de fer du Harz, pesant 55 t en ordre de marche, remorquent 125 t ou 2,28 fois leur poids en rampe de 58 mm, à la vitesse de 12 km à l'heure. L'intérêt des chemins de fer à crémaillère ne se manifeste par conséquent que pour les vitesses inférieures à 15 km à l'heure; jusque-là la simple adhérence suffit parfaitement. Pour les chemins de fer où la locomotive à

vapeur est employée, la limite des pentes des lignes à adhérence semble être entre 45 et 50 mm ; au delà, il faut recourir à la crémaillère.

DÉSIGNATION DES MACHINES	DÉCLIVITÉ MAXIMA	VITESSE EN KILOMÈTRES à l'heure	POIDS DE LA MACHINE ET DU TENDER en ordre de marche π	CHARGE remorquée P	RAPPORT $\frac{P}{\pi}$
	Millim.		Kilogr.	Tonnes	
<i>Compagnie P.-O. (Clermont-Volvic).</i>	25	25	71,530	180	2,5
Série 1124-1258, 8 roues accouplées. .	25	25	60,600	130	2,1
Série 1566-1603, 6 roues accouplées. .	»	»	»	»	»
Murat à Aurillac, 8 roues accouplées .	30	12	68,220	126	1,85
<i>Midi.</i>					
8 roues accouplées.	33	12 à 15	99,800	100	2,0
<i>Haute-Italie.</i>					
Bologne à Pistoia, 6 roues accouplées .	25	20	51	116	2,2
<i>Madrid-Saragosse-Alicante.</i>					
Mérida-Séville, Tocino-Pedroso, série 501-546, 8 roues accouplées	27,7	15	70,080	144	2,05
Machine-tender à adhérence totale de Riom-Volvic	36	12	23,000	50	2,2
Landquart-Davos	45	18	40,000	70	1,75

Pour les lignes électriques exploitées par véhicules automobiles on peut aller beaucoup plus loin ; citons la ligne du Fayet à Chamonix avec pentes de 90 mm, le tramway de Longemer à Retournemer comportant des pentes de 95 mm, le tramway de la côte du Havre comportant une pente de 98 mm sur 310 m, les tramways de Boulogne et de Laon qui offrent respectivement des déclivités de 120 et 122 mm.

L'absence de crémaillère sur des lignes à pentes aussi raides nécessite des précautions toutes particulières et des dispositifs spéciaux au point de vue du freinage, on le comprend aisément, en vue de parer à un abaissement toujours possible du coefficient d'adhérence.

La première application sérieuse d'un chemin à crémaillère fut faite en Europe par l'éminent Ingénieur Riggerbach, notre regretté Collègue. Le 2 août 1863 Nicolas Riggerbach pre-

nait un brevet relatif à l'emploi de la crémaillère, mais ce n'est qu'en 1869 que l'application en fut faite au chemin du Rigi; on sait avec quel succès.

Toutes les dispositions de la voie et des machines du Rigi ont été en effet parfaitement étudiées par Riggerbach et ont fait largement leurs preuves.

En outre, Riggerbach eut l'heureuse fortune de débiter par une ligne de plaisance où les éléments de trafic ne faisaient pas défaut, qui a donné des résultats excellents au point de vue financier, ce qui est toujours fort appréciable.

Nous n'entrerons pas dans la discussion des questions de priorité qui se sont élevées au sujet de l'adaptation de la crémaillère à la traction sur les voies ferrées; ce qui paraît certain, c'est que, le premier en Europe, Riggerbach a construit et perfectionné les chemins à crémaillère.

Avant de décrire le tracé de quelques lignes à crémaillère, disons que l'on distingue les lignes entièrement à crémaillère et les lignes mixtes. On appelle chemin mixte, une ligne comportant alternativement des sections à adhérence et à crémaillère. La machine passe successivement de l'une à l'autre des sections; l'entrée et la sortie de la roue dentée aux origines de la crémaillère sont facilitées, comme nous le verrons, par l'emploi d'un tronçon de crémaillère mobile appelé pièce d'entrée.

Nous décrirons succinctement le tracé de quelques chemins à crémaillère; le cadre du travail nous obligeant à être très bref à cet égard.

CHAPITRE II

Description de tracés de lignes à crémaillère.

Nous commencerons par parler d'une des entreprises les plus audacieuses que les Ingénieurs aient jamais tentées : nous voulons parler du chemin de fer de la Jungfrau.

Nous citons seulement pour mémoire, les lignes du Rigi, de Rorschach-Heiden, du Mont-Pilate, de Snowdon, du Mont-Salève, du Rothorn, d'Aix-les-Bains au Revard, etc.....

CHEMIN DE LA JUNGFRAU.

Le projet exécuté à la Jungfrau est dû à l'initiative de M. Guyer-Zeeler, de Zurich.

Trois demandes de concession avaient été faites antérieurement.

Deux projets furent présentés en 1889; l'un, par M. Kœchlin, l'Ingénieur qui a pris une part si importante à la construction de la Tour Eiffel, partait de Lauterbrunnen et arrivait au sommet de la Jungfrau par un tunnel de 5 460 m, la rampe maxima était de 59 %; la hauteur gravie était de 3 175 m; la traction prévue était la traction funiculaire.

Un second projet présenté par M. Trautweiler, l'Ingénieur du Gothard, avait son origine à 3 km au-dessus de Lauterbrunnen; la ligne, longue de 6 500 m, comportait quatre tunnels successifs et des déclivités de 98 %; la traction prévue était également la traction funiculaire.

Une troisième demande fut faite aussi par le colonel Locher, le constructeur du chemin du Mont-Pilate. Son projet prévoyait deux tunnels circulaires parallèles formant des tubes pneumatiques; dans l'intérieur de ces tubes, les voitures, munies d'un piston glissant sur les parois du tunnel, auraient été poussées ou aspirées par pression d'air comme les cylindres de la poste pneumatique.

Ces trois projets avaient l'inconvénient de mal se prêter à des arrêts intermédiaires pour jouir des divers points de vue constituant le principal attrait du voyage.

Le projet exécuté, que montre la figure 1, part de la station de la Petite Scheidegg à l'altitude de 2 064 m, sur la ligne de Grindelwald à Lauterbrunnen; la longueur du tracé sera d'environ 12 km. De la station de la Scheidegg, la ligne monte à l'Eiger Gletscher, puis va contourner l'énorme massif de l'Eiger, se replie, et passant vers le Mönch, se dirige vers le sommet de la Jungfrau. L'avantage de ce tracé, plus long de beaucoup que les précédents, est de réduire les déclivités à 250 mm et d'offrir aux touristes des vues incomparables et variées sur les deux versants de la montagne.

Les stations intermédiaires, ouvertes actuellement à l'exploitation, sont celles de Eiger Gletscher (2 323 m), Rothstockwand (2 530), Eigerwand (2 867), Eismeer (3 156); au delà de la sta-

tion d'Eiger Gletscher, la ligne entre dans un tunnel qui se continue sur 10 km environ jusqu'au sommet de la Jungfrau à la cote de 4466 m.

La largeur de la voie est de 1 m, le rayon minimum des courbes de 100 m; la voie a été étudiée par M. Strub, qui a fait une belle application de son système de crémaillère. La traction est faite par des locomotives électriques poussant un train de deux voitures emmenant 80 personnes. Inutile d'ajouter que la force motrice est empruntée à la houille blanche. Le courant triphasé, produit à l'usine à la tension de 7000 volts, est amené à la station de la Petite Scheidegg, où un transformateur le ramène à 500 volts.

Les dépenses d'établissement ont été évaluées à 10 millions, soit 840 000 f par kilomètre.

En 1902, alors que la ligne n'était ouverte que jusqu'au Rothstock, les recettes se sont élevées, pour la longueur de 2882 m et pendant les trois mois d'exploitation, à 160 800 f, soit 55 000 f par kilomètre, assurant au capital un revenu de 4 %; de tels résultats sont fort encourageants et font bien augurer de l'avenir de la ligne.

Il reste encore actuellement, pour terminer la ligne, à franchir un kilomètre en hauteur.

L'ascension complète durera trois heures et coûtera 50 f par personne aller et retour.

La station de la Jungfrau (4466 m) est à 73 m au-dessous du sommet; de là, un ascenseur élèvera les touristes jusqu'au sommet.

On comprendra sans peine qu'à cette altitude les travaux de construction ont donné lieu à des difficultés multiples, non seulement pour leur exécution, mais aussi pour l'approvisionnement des ouvriers et leur installation. On a dû prévoir jusqu'à une boulangerie à proximité des chantiers, les communications étant interrompues l'hiver avec la vallée.

En terminant, souhaitons bonne réussite à l'œuvre véritablement gigantesque conçue et entreprise par les Ingénieurs suisses, qui restera comme un monument impérissable du génie civil et de la hardiesse humaine.

Je devrai encore parler des lignes du Schaffberg, du Gaisberg, du Schnéeberg en Autriche, du chemin du Vésuve en Italie, et de plusieurs autres encore, mais le cadre de cette étude est limité et je dirai seulement quelques mots de la ligne du Gor-



Fig. 1.

nergratt, qui depuis 1898 a atteint l'altitude de 3 020 m, la plus haute en Europe; elle n'est dépassée que depuis l'an dernier par la ligne de la Jungfrau; nous disons en Europe, car en Amérique le chemin à crémaillère de Manitou au Pikes-Peak atteint l'altitude de 4 020 m.

GORNERGRAT.

La ligne du Gornergrat part de la station de Zermatt à l'extrémité de la ligne à crémaillère de Viège-Zermatt dont il sera parlé plus loin. Elle est à voie de 1 m; le rayon minimum des courbes est de 80 m, les pentes maxima sont de 20 mm; la hauteur gravie est de 1 600 m.

Le tracé, assez sinueux en plan, a exigé la construction de deux ouvrages d'art et de cinq tunnels de faible longueur.

La ligne est à traction électrique à courants triphasés; les locomotives, du poids de 10,5 t, alimentées par du courant à 510 volts, poussent deux voitures, l'une ouverte, l'autre fermée, à la vitesse de 7 km à l'heure.

Avec les arrêts aux trois stations intermédiaires, la durée du trajet est d'une heure et demie.

La construction à forfait de la ligne fut concédée à MM. Haag et Greulich pour la somme de 3 millions de francs, compris le matériel roulant et les installations électriques; les travaux, commencés en 1896, furent interrompus par les intempéries, et la ligne ne fut terminée qu'en 1898.

Il est intéressant de noter que jusqu'à l'altitude 2 700 m aucun cas de mal de montagne n'avait été constaté chez les ouvriers, pour la plupart Italiens; au-dessus de cette altitude, un certain nombre de cas se manifestèrent; les phénomènes morbides disparaissaient d'ailleurs complètement au bout d'un séjour de deux ou trois jours dans la vallée de Zermatt.

Nous allons maintenant nous occuper de la seconde catégorie des chemins de fer à crémaillère comportant alternativement des sections à crémaillère et à adhérence; ce sont les chemins mixtes.

Venues après les chemins entièrement à crémaillère, les lignes mixtes se sont répandues rapidement.

L'une des lignes les plus importantes et les plus anciennes est celle de Blankenbourg à Tanne dans le Harz, établie à voie normale et longue de 30,5 km. Elle dessert un pays minier où

se trouvent des hauts fourneaux et des carrières; elle est ouverte à tous les transports G. V. et P. V. depuis l'année 1885. Les déclivités maxima sont de 60 mm. dans les sections à crémaillère, de 25 mm en adhérence; le rayon minimum des courbes est de 200 m.

Le prix de l'établissement est de 180 700 f par kilomètre, y compris le matériel roulant; la ligne est à une voie. La crémaillère adoptée est du type Abt à 3 lames.

Après avoir cité seulement la ligne du Höllenthal, longue de

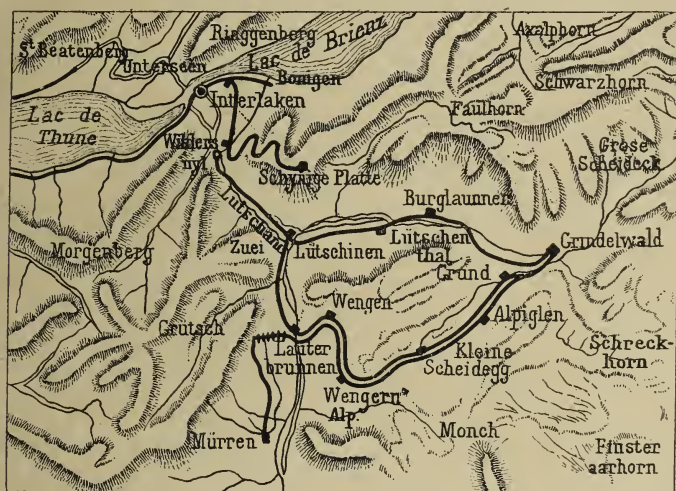


FIG. 2.

35 km, ligne à voie normale, celle de Langres, la ligne du Brünig reliant Brienz au lac des Quatre-Cantons, et celle de Viège-Zermatt, nous décrirons succinctement les lignes de l'Oberland Bernois.

L'ensemble des chemins à crémaillère de l'Oberland Bernois est représenté par la figure 2.

OBERLAND BERNOIS.

L'étude de ces chemins remonte à 1873; cependant c'est seulement en 1886 que fut donnée la concession d'un chemin à voie étroite de Bönigen (570) sur le lac de Brienz, à l'est d'Interlaken, à Lauterbrunnen (799); puis en 1887, le prolongement de Zweilütschinen (655) au Grindelwald (1038) fut concédé. Deux

lignes furent construites vers Grindelwald, la plus courte par Burglaunen, l'autre par Lauterbrunnen et la Petite-Scheidegg. Entre Bönigen et Zweilütschinen se trouve la station de Vilderswyl, d'où part une ligne à crémaillère montant à la Schynige-Platte (1 970); de Lauterbrunnen part un funiculaire montant à Grütsch (1 490), origine d'un chemin de fer électrique montant à Mürren (1 642). Nous rappelons que c'est de la station de la Petite-Scheidegg que part le chemin de la Jungfrau.

La figure 2 montre en plan l'ensemble de ces lignes.

La ligne est à voie de 1 m; les déclivités maxima sont de 120 mm, le rayon minimum des courbes de 120 m. Les locomotives à vapeur, du poids de 28 t. sont à quatre cylindres; la crémaillère est du type Riggensbach. Les frais de construction pour 23 km se sont élevés à 3 488 000 f, soit 136 400 f par kilomètre.

On compte chaque année 190 000 voyageurs et 11 000 t de marchandises transportés, produisant une recette annuelle d'environ 400 000 f, dont 343 750 f ou 86 0/0 pour les voyageurs.

Les chemins de fer mixtes, surtout ceux du système Abt, se sont successivement développés dans les divers pays; en 1891, s'ouvrent à l'exploitation, en Grèce, le chemin de Diakophtokalavrita; en Bosnie, celui de Rama-Sarajevo; en 1892, au Japon, le chemin d'Usuipass; en 1894, celui de Beyrouth-Damas, en Asie-Mineure; en 1896, celui de Mount-Lyell; en 1898, la ligne du Nilgiri aux Indes Anglaises; il serait trop long d'énumérer ici toutes les lignes construites.

De l'examen de ces lignes, il résulte :

1° Que la crémaillère n'est pas utilisée au-dessous des déclivités de 50 mm;

2° Que la pente maxima abordée est celle de 480 mm au Pilate;

3° Quant aux rayons des courbes, dans les sections à crémaillère ils ne s'abaissent pas au-dessous de 100 m avec la voie de 1 m, à la seule exception du chemin de fer routier de Saint-Gall-Gais dans le canton d'Appenzel, en Suisse, où l'on a admis en crémaillère des rayons de 30 m.

CHAPITRE III

Voie et crémaillère.

La voie courante, en ce qui concerne les rails de roulement, n'offre pas de particularités spéciales sur les chemins à crémaillère; les traverses doivent, en plus des rails de roulement, recevoir au milieu la crémaillère, soit directement, soit, le plus généralement, au moyen de coussinets ou supports spéciaux.

La particularité à signaler pour la voie des chemins à crémaillère, consiste dans les précautions prises pour résister au glissement longitudinal. Au Vitznau-Rigi, par exemple, la crémaillère est poussée en sens inverse de la marche par une force de 6 t; on comprend, dès lors, combien il importe de s'opposer à ce glissement longitudinal.

Les moyens employés consistent généralement à relier les traverses par deux cours de moises courant parallèlement aux rails et fixées symétriquement de part et d'autre de l'axe. Au lieu de moises on emploie actuellement des fers U posés à plat et tirefonnés sur les traverses. Avec les traverses métalliques, dont la section en U renversé pénètre dans le ballast, la nécessité de relier les traverses dans le sens longitudinal est moins pressante.

Lorsque la pente est raide il faut, en outre, de distance en distance, faire buter la traverse contre un arrêt fixe solidement implanté dans la plate-forme.

Au chemin de Beyrouth-Damas, par exemple, dans les pentes de 70 mm les traverses métalliques ne sont pas reliées les unes aux autres, mais de 60 en 60 m la traverse bute à l'aval contre un solide bloc de béton fondé sur le rocher; au Pilate, la pente de 480 mm a nécessité l'emploi d'une voie entièrement maçonnée et solidement ancrée dans le massif de maçonnerie.

Remarquons, en passant, que l'emploi de la traction électrique, permettant l'emploi de moteurs plus légers, a l'avantage de diminuer la poussée longitudinale.

EFFORT SUPPORTÉ PAR LA CRÉMAILLÈRE.

Cette poussée peut se calculer ainsi :

Soit i la pente de la voie,

P le poids total du train ;

V sa vitesse ;

L le parcours effectué pendant la période de serrage des freins jusqu'à l'arrêt. Au moment du serrage des freins, la force sollicitant le train est :

$$P \sin i + \frac{PV^2}{2gL}.$$

Soit F la force destinée à annuler la force vive, elle communiquerait sur une longueur L une vitesse V à la masse $\frac{P}{G}$, soit γ son accélération : $V = \gamma t$ et $L = \frac{1}{2} \gamma t^2$, d'où : $\gamma = \frac{V^2}{2L}$;

$$\text{donc : } \frac{F}{P} = \frac{\frac{V^2}{2L}}{g} \text{ et } F = \frac{V^2 P}{2gL} ;$$

la pression totale sur la crémaillère sera donc :

$$Q = \frac{PV^2}{2gL} + P \sin i.$$

Appliquons au Vitznau-Rigi :

$$V = 2 \text{ m} ; P = 20\,000 \text{ kg} ; \sin i = \operatorname{tg} i = \frac{1}{4}.$$

Si l'arrêt doit s'effectuer sur 10 m :

$$Q = \frac{20\,000 \times (2)^2}{2 \times 9,8 \times 10} + \frac{20\,000}{4} = \frac{4\,000}{9,8} + 5\,000.$$

$$Q = 400 + 5\,000 ;$$

si, au lieu de 2 m, $V = 3$, m le terme dû à la force vive passe de 400 à 900 kg ; on voit par là la nécessité d'éviter toute accélération.

Nous examinerons maintenant les divers types de crémaillère usités :

La crémaillère Riggerbach ;

verticaux ont la même largeur; dans l'autre, l'aile supérieure est plus étroite comme l'indiquent les croquis de la figure 3. La largeur du vide entre les montants varie de 100 à 140 mm; l'épaisseur de la roue dentée variant de 60 à 100 mm il reste de chaque côté de la roue un jeu de 20 mm environ.

La hauteur du trapèze des échelons varie de 36 à 46 mm; la petite base de 29 à 36 mm, la grande base de 54 à 95 mm; les arêtes supérieures des échelons sont arrondies.

Pour le type appliqué à Langres, la section des échelons est $\frac{54 + 36}{2} \times 36$, l'angle de la face de la dent avec les bases du trapèze est de $61^{\circ} 41' 20''$, le diamètre primitif de la dent est de 1 050 mm.

Les dents de la roue sont tracées par développantes de cercle; ce qui offre cet avantage que la distance de l'axe de la roue à la ligne primitive de la crémaillère peut varier légèrement sans inconvénient pour l'engrènement.

Le tracé est tel qu'il y a toujours deux dents de la roue en contact avec la crémaillère.

Pour une ligne entièrement à crémaillère, le rayon du cercle primitif de la roue dentée est égal au rayon du cercle de roulement des roues porteuses; la ligne primitive de la crémaillère doit être au niveau des rails.

Sur les lignes mixtes, il faut que dans les sections sans crémaillère, la roue dentée ne vienne pas toucher le sol. La roue dentée est alors portée par un arbre spécial et la crémaillère, surélevée, repose sur des coussinets.

On remarquera que sous l'action de la pression de la roue dentée, le dernier échelon contigu au joint d'aval au bas de chaque tronçon tend à cisailer le métal des montants verticaux.

Pour parer à cet effet, le dernier échelon d'aval est plus éloigné du joint que le premier échelon d'amont du joint.

Avec la division de 100 mm habituellement adoptée par Riggensbach, on prend ordinairement l'axe de l'échelon d'aval à 55 mm du joint, celui d'amont à 43 mm, il reste pour le joint $100 - (55 + 43) = 2$ mm, jeu suffisant pour des tronçons de crémaillère de 3 m à 3,50 m de largeur.

En effet, le coefficient de dilatation du fer est de 0,000014 par degré centigrade; soit pour 50 degrés de variation de température, une dilatation de 0,0007, qui représente pour un tronçon de 3 m de longueur une dilatation de 2 mm. Cette disposition

nécessaire a pour inconvénient, par sa dissymétrie, de s'opposer au retournement de la crémaillère bout pour bout.

Le métal des montants de la crémaillère est en fer ou en acier pas trop dur, présentant une résistance de 40 à 45 kg par millimètre carré avec un allongement de 20 à 30 0/0; le métal ne doit pas être trop dur pour permettre le perçage des trous des échelons dans les montants.

Primitivement la crémaillère était fixée directement sur les traverses de la voie; et lorsqu'il était nécessaire de la surélever on la posait sur deux longrines; mais cette disposition n'a pas donné de bons résultats et l'emploi de coussinets a paru préférable. L'emploi des traverses métalliques a permis, en outre, une précision plus grande et plus de solidité.

En outre, le surhaussement est indispensable sur les lignes à exploitation continue, pour éviter les obstructions causées par la neige qui se tasse entre les échelons de la crémaillère et s'oppose au passage de la roue dentée; le fait s'est produit cet hiver au chemin à crémaillère de Langres.

Au lieu de coussinet on emploie parfois une crémaillère surélevée comme l'indique la figure 4, c'est la solution adoptée au Brünig où les montants de la crémaillère ont 220 mm de haut, tandis qu'ils n'ont que 120 mm au Rigi. La solution du Brünig est simple et commode, la mise en place de la crémaillère est facile, mais elle conduit à alourdir notablement la crémaillère; le type du Brünig, montants et échelons, pèse 78 kg le mètre linéaire, celui du Rigi et de Langres 50, celui de Padang-Sumatra 37 kg. Au joint, la crémaillère porte sur un coussinet spécial, ou si elle est surélevée, le joint en porte à faux est renforcé par des fers d'angle boulonnés sous la semelle inférieure de la crémaillère. Ces fers d'angle viennent buter contre la traverse de joint de façon à s'opposer au glissement longitudinal.

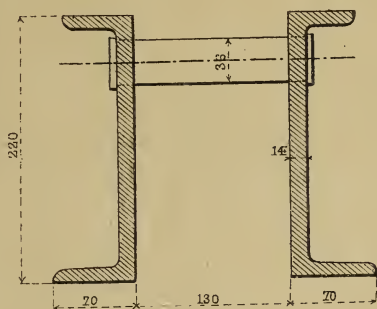


FIG. 4.

Au joint, la crémaillère porte sur un coussinet spécial, ou si elle est surélevée, le joint en porte à faux est renforcé par des fers d'angle boulonnés sous la semelle inférieure de la crémaillère. Ces fers d'angle viennent buter contre la traverse de joint de façon à s'opposer au glissement longitudinal.

A Langres, où la crémaillère est supportée au joint par des coussinets spéciaux, on a rivé sous la crémaillère des cornières qui viennent buter contre ce coussinet.

Avant de quitter ce genre de crémaillère, citons le type des

tramways de Trait-Planche à Montreux (Suisse), indiqué par la figure 5. La crémaillère n'est plus dans l'axe; mais l'un des montants est formé par l'un des rails de roulement lui-même; un autre rail, placé à 30 mm du premier, court parallèlement; les échelons relient ces deux rails; la roue dentée placée sur le côté de la machine passe dans cette ornière de 30 mm, que les

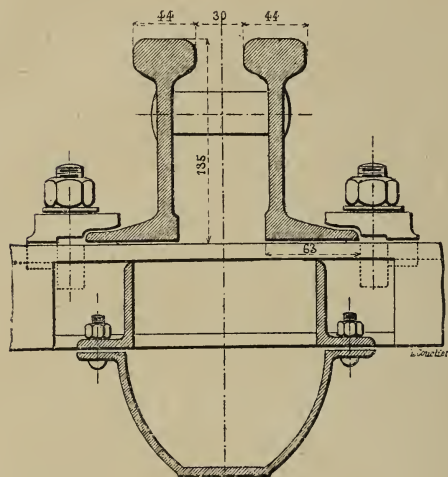


FIG. 5.

roues des véhicules ordinaires franchissent comme un passage à niveau de voie ferrée. L'ornière formée par les deux rails de la crémaillère devant être maintenue libre, les poussières et débris de la chaussée qui tombent dans ce canal sont recueillis dans une sorte de gouttière en tôle placée sous la crémaillère, formant comme un caniveau régissant sur toute la longueur de la crémaillère; les débris

sont évacués par un courant d'eau lancé dans ce caniveau. L'espacement des traverses de la crémaillère varie généralement de 0,750 m à 1 m.

CRÉMAILLÈRE BISSINGER ET KLOSE.

Au chemin de fer du Höltenthal on a adopté une modification de la crémaillère Rigggenbach due à MM. Bissinger et Klose.

Les têtes des échelons ne sont plus rivées sur les montants mais passent librement dans le trou percé dans le fer du montant. Les barreaux reposent en dessous sur une saillie régissant intérieurement sur toute la longueur du montant, de façon à rendre impossible toute rotation du barreau; un échelon sur quatre présente une tête filetée faisant saillie à l'extérieur sur le montant; un écrou permet le serrage, de façon à assurer la rigidité du système.

En outre, au joint de deux tronçons, quatre échelons portent également des boulons qui serrent des éclisses latérales en fer

plat contre les montants verticaux des fers à U, ce qui consolide le joint et assure la solidarité des deux fers à U. Cette crémaillère est représentée en coupes et élévation par la figure 6.

Ces éclisses latérales évitent la tendance au cisaillement au-dessous du dernier échelon d'aval; ce qui permet de faire une crémaillère symétrique pouvant se retourner bout pour bout. Les crémaillères reposent sur des coussinets en fonte.

L'avantage essentiel du système est que l'on peut changer un échelon avarié sans avoir à dériver tous les autres; de plus les trous pour le passage des échelons dans les fers U peuvent être

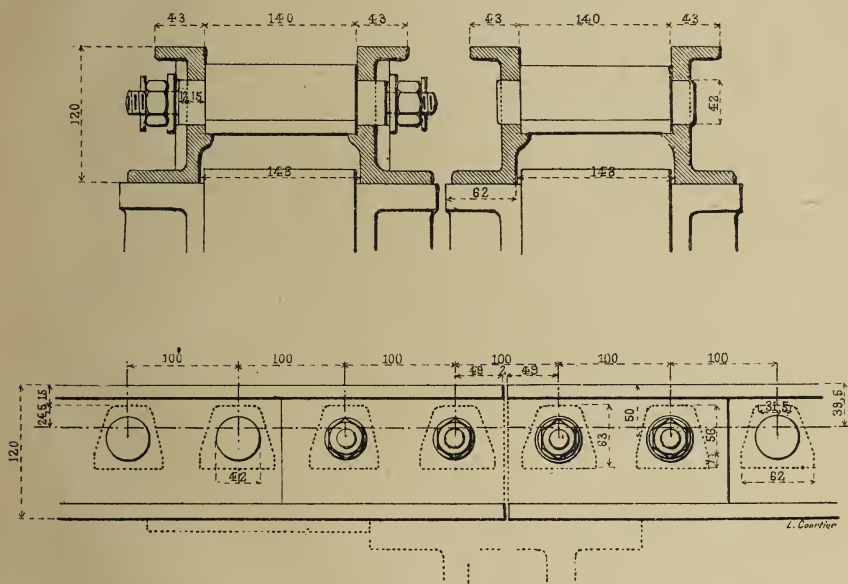


FIG. 6.

faits à la machine à percer, ce qui permet plus d'exactitude que le perçage à l'emporte-pièce qui doit forcément être employé pour la crémaillère Riggensbach, à cause de la forme trapézoïdale des dents. La crémaillère du Höllenthal pèse 101 kg le mètre linéaire avec les coussinets et éclisses.

Aux chemins de Saint-Gall-Gais en Suisse, d'Honau-Lichtenstein et Freudenstadt-Kloster-Reichenbach en Wurtemberg, on a employé une disposition différant peu de la précédente, due à M. Klose.

Dans cette disposition la crémaillère est portée par des coussinets élevés permettant le facile dégagement de la neige.

Les têtes des dents ne sont pas boulonnées comme dans le système Klose, mais pour assurer la solidarité, quelques échelons seulement sont rivés ; à signaler la précaution prise d'intercaler une rondelle entre la tête rivée et le fer du montant vertical, de façon à pouvoir refaire la rivure en cas de besoin. La crémaillère de Saint-Gall-Gais pèse seule 55 kg le mètre linéaire et 67,5 kg avec ses accessoires.

Le principal défaut de la crémaillère à échelons, outre le jeu que prennent les échelons, consiste dans la marche un peu saccadée des machines sur ces crémaillères, surtout si la vitesse doit dépasser 8 km à l'heure.

En outre, la construction de ces crémaillères est compliquée à cause du perçage des montants. C'est pour remédier à ces divers inconvénients que M. Abt, collaborateur de M. Riggenbach imagina le système des crémaillères à lames que nous allons décrire et qui s'est promptement répandu.

CRÉMAILLÈRE ABT.

C'est en 1882 que notre Collègue M. Roman Abt prit un brevet pour son système de crémaillère qui fut appliqué peu de temps après à l'importante ligne du Harz inaugurée en 1885. Depuis lors le système Abt s'est répandu dans tous les pays et l'on comptait, en 1899, 40 lignes où ce système était appliqué, représentant

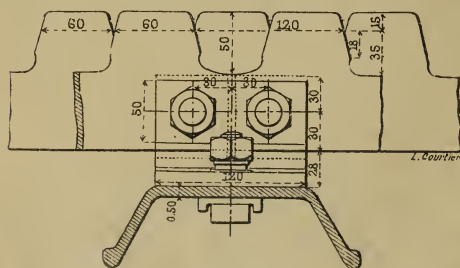


FIG. 7.

800 km de développement dont 290 km en crémaillères, sur lesquels circulaient 170 machines à vapeur ou électriques. La crémaillère Abt, représentée par la figure 7, est formée suivant le cas d'une, deux ou trois lames d'acier placées verticale-

ment et équidistantes; dans chacune de ces lames sont découpées des dents dont les vides et les pleins sont croisés. S'il y a deux lames, les axes des dents en projection verticale sont décalées d'un demi-pas; s'il y a trois lames, d'un tiers de pas.

Les dents sont tracées dans le système des développantes de cercle ; il y a par suite, toujours deux dents de la roue motrice en

prise sur chaque lame, soit quatre ou six s'il y a deux ou trois lames. Un pareil système permet donc un effort de traction plus considérable et assure en outre un mouvement plus doux que le système à échelons.

Les lames sont boulonnées de distance en distance sur des coussinets en fonte, ou mieux en acier fondu, à large base, fixés sur les traverses par des tirefonds ou des boulons suivant qu'il s'agit de traverses en bois ou de traverses métalliques, ces dernières étant plus généralement employées aujourd'hui ; la figure 8 indique cette disposition. La longueur des lames varie suivant qu'il s'agit de crémaillère à deux ou trois lames.

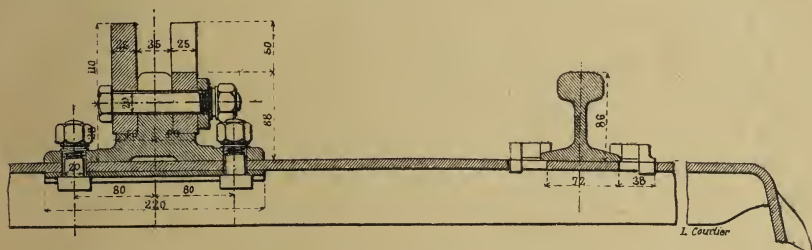


FIG. 8.

La longueur d'une lame est un multiple du pas, plus le jeu de la dilatation ; pour les crémaillères à deux lames, chaque lame compte 15 dents : soit pour un pas de 120 mm une longueur de $15 \times 120 = 1800$ mm, dont il faut déduire 4 mm pour le jeu de la dilatation, reste net une longueur de 1799 mm ; pour les crémaillères à trois lames comptant 22 dents, la longueur est de $120 \times 22 - 4 = 2636$ mm.

Les dimensions des dents sont généralement les suivantes : hauteur 50 mm, distance du dessus de la dent à la ligne primitive 15 mm, épaisseur 20 mm, hauteur 110 mm ; l'épaisseur varie de 15 mm au Harz à 32 mm au Pikes-Peak. En général on limite 1300 kg l'effort à supporter par chaque dent : pour une largeur de dent de 20 mm, cela représente 65 kg par millimètre de largeur de dent ; c'est à peu près le même chiffre que pour l'échelon Riggerbach.

Les coussinets de support sont distants de 900 mm environ. Le poids d'une lame est en moyenne de 15 kg le mètre linéaire. Les lames sont faites en acier Thomas ou Martin Siemens présentant une résistance de 48 à 50 kg par millimètre carré et un allongement de 18 à 20 0/0 ; les dents sont découpés à chaud

dans les lames. Les lames sont ensuite réunies par paquets, et on finit les dents à l'aide de la machine à raboter. Pour le chemin du Nilgiri et celui de Snowdon, on a construit une machine spéciale découpant les dents de ces lames d'acier.

Chaque lame est fixée sur les coussinets par deux boulons, soit par lame six boulons de 20 mm, disposition suffisante pour s'opposer à tout glissement longitudinal ; mais il est indispensable de veiller régulièrement au serrage des boulons. Aux extrémités de la lame les trous percés pour le passage des boulons sont ovalisés de façon à laisser le jeu de la dilatation.

Les crémaillères employées sont presque toutes du type à deux lames ; les seuls exemples de types à trois lames sont ceux du chemin du Harz et du chemin d'Usui-pass au Japon ; avec ce dernier type, il est plus difficile d'obtenir un contact régulier des dents des roues motrices avec celles des lames de la crémaillère.

La hauteur des coussinets est réglée de telle façon que la tête des dents se trouve pour les lignes mixtes de 55 à 75 mm au-dessus des rails de roulement, pour les lignes entièrement à crémaillère la cote ci-dessus est réduite à 50 mm.

La crémaillère Abt assure aux trains une marche plus rapide, elle permet d'aborder de fortes charges et elle donne aux trains un mouvement plus doux. Ce mouvement est d'autant plus doux que l'on peut ménager une certaine élasticité dans la fixation des roues dentées de la machine sur l'axe moteur, comme nous le décrirons à propos des locomotives Abt.

Il paraît démontré que la crémaillère Abt peut répondre aux exigences d'un trafic plus important que la crémaillère Riggensbach.

CRÉMAILLÈRE STRUB.

Cette crémaillère plus récente que les précédentes a été appliquée pour la première fois en 1890 au chemin de fer de la Jungfrau, elle n'est utilisée que pour les lignes entièrement à crémaillère, à l'exclusion des chemins mixtes ; elle a été utilisée successivement en 1902 au chemin de Triest-Opcina (Autriche) en 1902, au Vésuve en 1903, et en 1904 en Suisse au chemin de Martigny-Chatelard, comportant chacun des déclivités de 250 mm.

La crémaillère représentée par la figure 9 est constituée par un rail Vignole à patin élevé, dans le champignon duquel sont découpées les dents.

Les dents ont une forme très particulière cylindro-conique et entre deux dents consécutives, l'âme du rail est creusée de façon à ménager un vide dont le fond affecte une forme cylindrique.

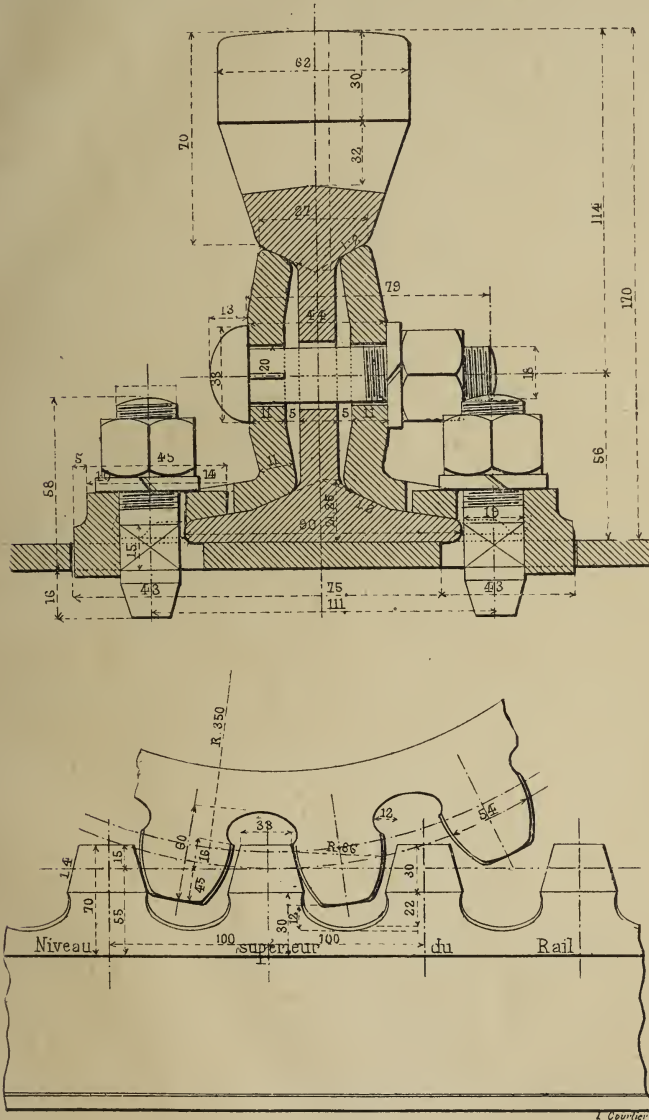


FIG. 9.

La forme du champignon, large de 62 mm, permet l'emploi de larges roues dentées pour des crémaillères légères ; on peut aussi saisir ce champignon par en-dessous, entre deux branches de te-

naillles, constituant ainsi un frein à mâchoires, s'opposant au besoin à la tendance au soulèvement du véhicule. Il est à noter que cette précaution est plus nécessaire avec la crémaillère Strub, parce que dans les types à échelon les montants verticaux s'opposent à un déplacement latéral de la voiture.

Le large patin du rail assure une bonne assiette et l'emploi de fortes éclisses au joint suspendu permet un affleurement parfait des deux tronçons contigus de crémaillère.

En outre, la crémaillère peut être retournée bout pour bout, les deux extrémités étant identiques.

Enfin, par suite de la forme des dents, la neige ne peut gêner le passage de la roue dentée, et elle est facilement expulsée.

Le rail de la crémaillère Strub est fait en acier doux, présentant une résistance à la rupture de 45 kg par millimètre carré avec allongement de 20 0/0.

La crémaillère est fixée sur les traverses par des coussinets ayant la forme de deux sortes de joues en fer embrassant l'âme verticale du rail, et se terminant à la base par des semelles qui appuient sur la face supérieure du patin du rail; des boulons traversent les deux joues et l'âme du rail, et assurent la continuité de la crémaillère, tandis que les semelles des coussinets sont boulonnées sur les traverses et y appliquent par pression le patin du rail.

Les dimensions habituelles de la crémaillère Strub sont les suivantes:

Pas de la denture 80 ou 100 mm; hauteur des dents 30 mm;

Inclinaison des faces des dents $1/4$; largeur 82 mm;

Largeur de la roue dentée 70 mm;

Hauteur de la crémaillère 140 à 170 mm;

Poids de la crémaillère 31 à 34 kg le mètre linéaire.

La crémaillère Strub paraît tout aussi rigide que la crémaillère Riggerbach, ses divers avantages, sa solidité, sa simplicité paraissent devoir lui assurer un prompt développement.

Elle doit être employée pour un chemin projeté au Fleimserthal dans le Tyrol et dans une colonie allemande du Sud-Est de l'Afrique.

CRÉMAILLÈRE LOCHER.

Ce type ne compte qu'une seule application, celle du Mont Pilate; mais elle mérite d'être citée, car c'est le seul cas d'un chemin à crémaillère en déclivité de 480 mm.

Les essais faits au début des études du chemin du Pilate, montrèrent que sur une pareille pente la roue dentée sort facilement des dents d'une crémaillère des types précédents.

Soit, en effet, F la force parallèle à la voie sollicitant la roue dentée, i l'angle de la voie avec l'horizon. La force F , peut se décomposer en deux, l'une horizontale, l'autre verticale, $F \sin i$

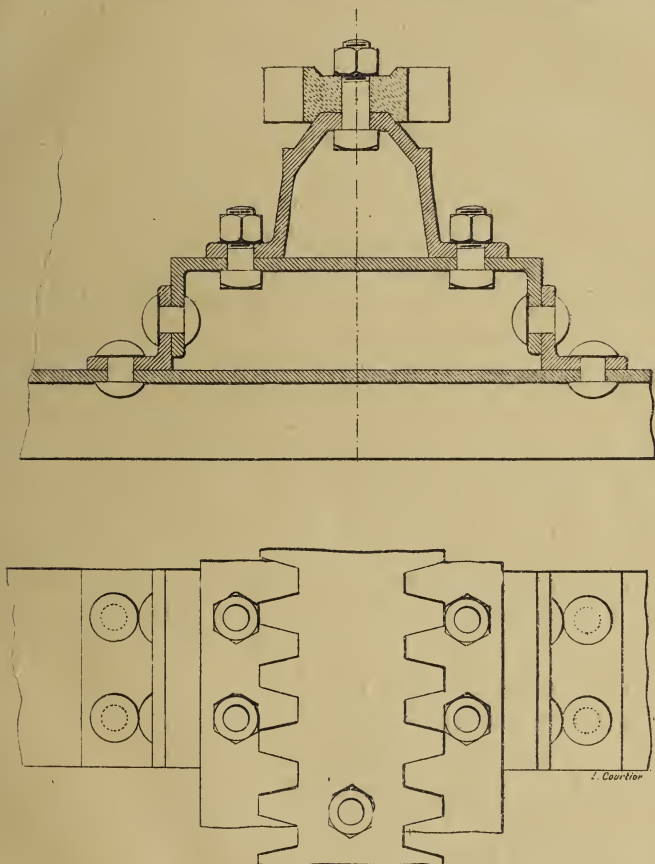


FIG. 10.

tendant à soulever la roue; pour $i = 30$ degrés, pente de $1/2$ c'est-à-dire à peu près celle du Mont Pilate, $F \sin i = 1/2 F$; on comprend que dans ces conditions la stabilité de la roue n'est plus assurée.

Pour remédier à cet inconvénient M. le colonel Locher prit des lames taillées en forme de crémaillère double, et les disposa dos à dos horizontalement les dents tournées vers l'extérieur; deux

roues dentées placées horizontalement engrènent chacune avec les dents d'une crémaillère ; ces roues dentées sont disposées symétriquement par rapport à l'axe de la voie, comme le montre la figure 10.

Les barres formant la crémaillère double ont 2398 mm de longueur, 130 mm de largeur et 40 mm d'épaisseur. Les dents ont 28 mm de hauteur dont 13 au-dessus de la ligne primitive ; le pas est de 35,7 mm.

Chaque barre constituant la crémaillère double est supportée par des fers Zorès de 100 mm de hauteur ; ces fers forment une table d'appui continue régnant sur toute la longueur de la crémaillère.

Ce fer Zorès est soutenu lui-même au-dessus des traverses métalliques par une sorte de cloche formée de fers U de 140 mm de longueur ; les bords inférieurs de ces fers Zorès sont boulonnés à des cornières rivées sur les traverses métalliques de la voie.

Des boulons verticaux fixent la barre de la crémaillère double aux fers Zorès. Ces boulons doivent être soigneusement serrés pour éviter qu'ils ne travaillent au cisaillement sous l'action de la poussée des roues motrices.

Les roues dentées ont une épaisseur de 50 mm, de sorte qu'elles font saillie de 5 mm, tant au-dessus qu'au-dessous de la crémaillère. Les traverses supportant les rails de roulement et la crémaillère sont ancrées dans la voie par de forts boulons, scellés dans un massif de maçonnerie, dont la partie supérieure est recouverte de dalles de granit.

Les barres de crémaillère ont 3 m de long, les rails 6 m ; on compte dans une travée huit traverses, les deux traverses du milieu sont distantes de 580 mm ; c'est également la distance des traverses de joint à l'about du rail ; les autres traverses sont distantes de 1,310 m.

La crémaillère est faite d'une barre d'acier Martin d'une résistance de 50 à 60 kg par millimètre carré, dans laquelle les dents sont découpées. Pour les parties en courbe, le rail est incurvé après le découpage des dents dans une barre droite. On remarquera que les deux roues motrices qui enserrèrent entre elles la crémaillère font le même nombre de tours, car elles sont conduites par un même arbre moteur. Or, dans les courbes, la crémaillère extérieure a un développement quelque peu supérieur à celui de la crémaillère intérieure. Mais la différence est faible,

et dans une courbe de 80 m. de rayon, l'écart avec la division normale n'est que de 0.06 m.

Bien que ce système de crémaillère ait donné d'excellents résultats au Pilate, il ne s'est cependant pas répandu, en réalité parce que ce système n'est intéressant que pour des lignes à pentes extrêmement raides, et que, dans ce cas, le système funiculaire est généralement plus indiqué que le système à crémaillère.

PIÈCES D'ENTRÉE DE LA CRÉMAILLÈRE.

Sur toutes les lignes mixtes, où l'on passe alternativement d'une section à adhérence à une section à crémaillère, on ne peut laisser la roue motrice aborder brusquement la crémaillère, non seulement parce qu'il y aurait choc, mais aussi parce que l'engrènement pourrait ne se produire que très difficilement. Pour éviter ces inconvénients, on dispose, à l'entrée de la section, un tronçon de crémaillère mobile autour d'un axe horizontal, à l'extrémité opposée à l'entrée, et supportée d'autre part par un ou plusieurs ressorts, ainsi que le montre la figure 11. Lorsque la roue dentée aborde cette pièce, celle-ci s'abaisse sous la pression, et comme le pas p' de la pièce d'entrée est plus petit que le pas p de la crémaillère, l'engrènement se produit forcément au bout d'un certain temps; soit en effet n le nombre de dents venues en contact au moment de l'engrènement, a la distance séparant l'arête d'une dent de la roue dentée de l'arête d'une dent de la crémaillère à l'entrée.

On aura, au moment de l'engrènement :

$$np = a + np',$$

d'où :

$$n = \frac{a}{p - p'};$$

A partir du moment où l'engrènement s'est produit, la roue dentée roule sur une crémaillère d'un pas légèrement inférieur au sien, ce qui produit des glissements.

Cet inconvénient est évité avec les machines à deux mécanismes. La crémaillère des pièces d'entrée est toujours une crémaillère à lames du type Abt; la disposition des pièces d'entrée est due d'ailleurs à cet Ingénieur.

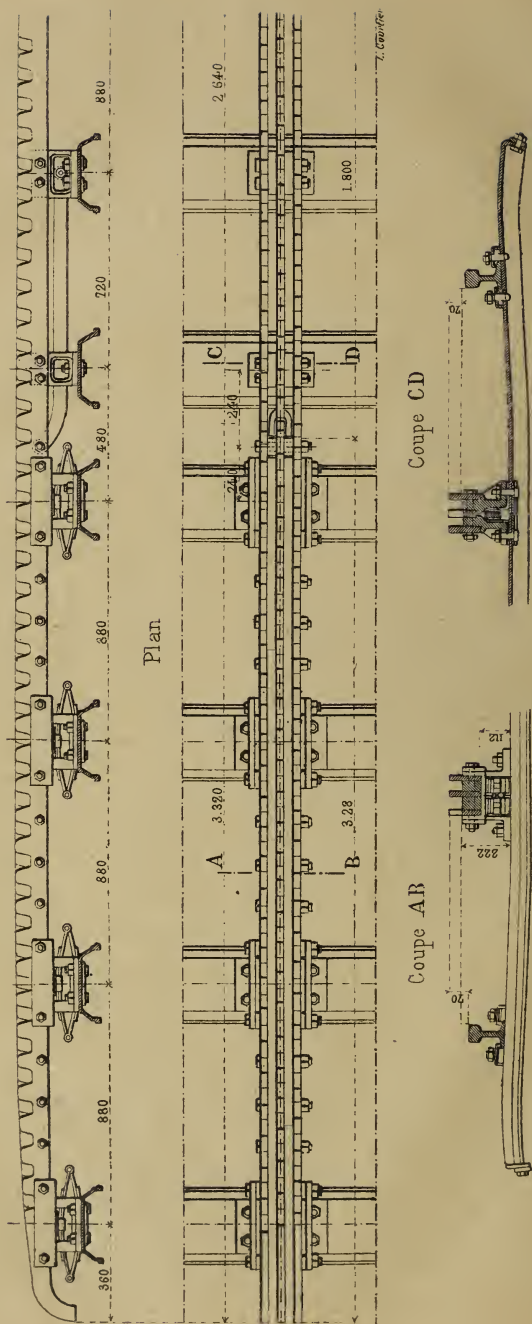


FIG. 11.

PRIX DE REVIENT DE LA CRÉMAILLÈRE.

Le prix, ou pour parler plus exactement, le surcroît de dépenses d'établissement de la voie courante peut être évalué dans des conditions moyennes à 30 ou 40 f le mètre linéaire.

Au Höllenthal, la crémaillère Abt est revenue à 42,50 f le mètre linéaire. À Langres, la crémaillère seule a coûté 27 f le mètre linéaire.

CHAPITRE IV

Machines. — Matériel roulant.

Traction électrique.

Les machines des chemins à crémaillère, qu'il s'agisse de locomotives à vapeur ou de moteurs électriques, peuvent se ranger en quatre classes :

1° *Machines destinées aux chemins entièrement à crémaillère*, se divisant en deux groupes :

(a) Machines simples dans lesquelles les roues porteuses n'étant pas actionnées par le moteur, la roue dentée concourt seule à la propulsion.

(b) Machines dans lesquelles les roues porteuses concourent à la propulsion concurremment avec la roue dentée.

Dans ce cas, l'effort de traction se partage entre les roues dentées et les roues porteuses, ce qui permet de diminuer la poussée sur la crémaillère en utilisant l'adhérence de la machine. Avec ces machines, si D et D' sont les diamètres des roues dentées et porteuses, pour une rotation d'un angle dx il faut que $D \times dx = D' \times dx$, si $D \geq D'$ il y a glissement.

D'autre part avec les machines de la classe (a) l'effort moteur est entièrement supporté par la roue dentée et par conséquent par la crémaillère.

Pour la machine du Rigi dont l'effort de traction est de 6.000 kg et qui pèse 12.500 kg, si l'on compte l'adhérence au $\frac{1}{7}$ les roues porteuses pourraient faire face à un effort de

$\frac{12.500}{7} = 1800$ kg, soit 0,33 de l'effort total, ce qui représente, à

la vitesse de 7 kilomètres à l'heure, un travail de 43 chevaux à fournir par la roue dentée seule, qui aurait pu être demandé aux roués porteuses.

La perte de travail due au glissement correspondant à la différence de diamètre des roues porteuses et dentées est assez faible, elle est du même ordre de grandeur que le glissement des roues solidaires sur les files des rails extérieurs et intérieurs en courbe.

2^o *Machines destinées aux chemins mixtes*, se divisant également en deux classes :

(a) Machines dans lesquelles les roues dentées et les roues motrices sont mues par un seul mécanisme.

(b) Machines ayant deux mécanismes distincts, un pour le système à adhérence, l'autre pour le système à crémaillère.

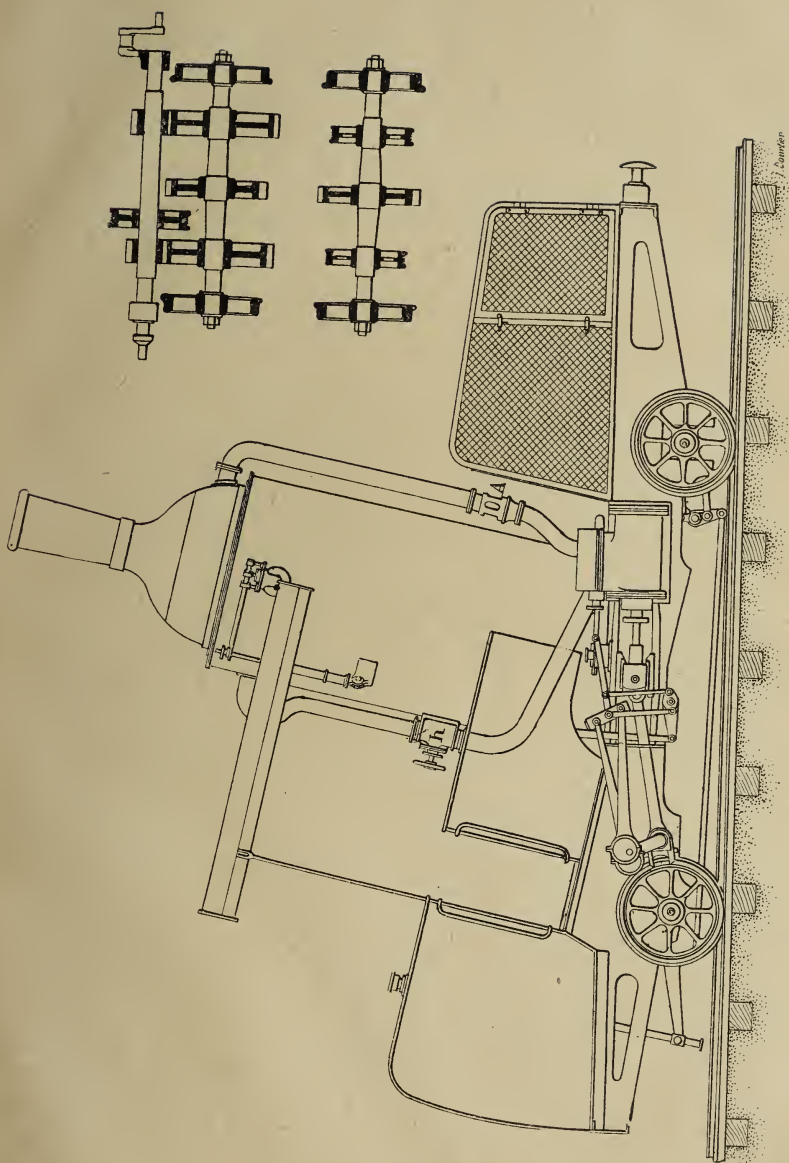
1^{re} Classe.

MACHINES DESTINÉES AUX CHEMINS ENTIÈREMENT A CRÉMAILLÈRE.

Machines simples : Catégorie (a). Type du Rigi. — La figure 12 montre la machine primitive du Rigi, à chaudière type vertical, portée par quatre roues folles sur les essieux, tandis que la roue dentée motrice est calée sur l'essieu arrière; un arbre intermédiaire, attaqué par les bielles motrices, conduit cet essieu à l'aide d'un pignon et d'une roue dentée. Cette machine était munie du dispositif bien connu maintenant consistant à renverser à la descente la distribution et à utiliser la compression de l'air pour modérer la vitesse. En outre, au milieu de l'essieu d'avant était calée une roue dentée engrenant avec la crémaillère, et de part et d'autre de cette roue, calées sur le même axe, deux poulies de friction pouvaient être enserrées entre deux mâchoires à la volonté du mécanicien : disposition devenue classique aujourd'hui.

Ces machines pesaient 40 t à vide, 125 t. en charge, elles remorquaient un train de 9 t à la vitesse de 5 km à l'heure sur la rampe de 250 mm.

En 1884, ces machines ont été remplacées par d'autres à chaudières, du type horizontal.



TYPE D'ARTH RIGI.

Dans ce type, la roue dentée motrice est calée, non plus sur l'un des deux essieux porteurs, mais sur un arbre spécial, placé à proximité du centre de gravité de la machine.

Cette disposition assure dans tous les cas une bonne répartition de charge sur l'arbre moteur et évite la tendance au soulèvement. En outre, le diamètre de la roue dentée peut être plus grand, ce qui permet d'obtenir un meilleur engrènement et une usure plus régulière de la roue dentée. Les données principales de ce type sont les suivantes :

Diamètre de la roue motrice.	955 à 1050 m m
Empattement.	2,35 à 3 m
Diamètre des cylindres . . .	300 à 320 m m
Course des pistons	5000 m m
Pression à la chaudière . . .	10 à 11 atm
Poids à vide	14 t environ
— en ordre de marche . .	17 t

Ce type de locomotive est employé aux chemins d'Arth Rigi, du Kahlenberg, du Schwabenberg, du Drachenfels, du Gaisberg, de Petropolis; il ne comporte qu'une seule roue motrice.

MACHINES A DEUX ROUES DENTÉES MOTRICES.

Catégorie (b). Les locomotives de ce type construites depuis plusieurs années ont deux roues dentées motrices. La machine est alors portée par trois essieux; l'essieu d'arrière de plus petit diamètre, simplement porteur, est supporté par un Bissel; les roues dentées sont calées sur les deux essieux d'avant, supportées par les roues porteuses laissées folles sur l'essieu. Le plus ordinairement, l'un des deux essieux portant les roues dentées reçoit l'impulsion du piston par l'intermédiaire d'un balancier, le deuxième essieu est entraîné par le premier à l'aide d'une bielle d'accouplement; la figure 13 montre le schéma de cette disposition.

Nous citerons comme machine de ce type, celle du Schneeberg construite pour voie de 1 m, la ligne comporte des pentes de 200 m m, le rayon minimum des courbes est de 80 m; la crémaillère est du type Abt à deux lames.

La machine pousse un train pesant 16 t; ses données principales sont les suivantes :

Pression de la chaudière	14 atm
Surface de chauffe	39,8 mq
Diamètre des cylindres	320 mm
Course des pistons	600 mm
Diamètre roue dentée motrice . . .	573 mm
— porteuses avant	706 mm
— » arrière	520 mm
Empattement	3,17 m
Poids de la machine à vide	13,8 t
— à charge	16,3 t
Effort de traction	7.200 k

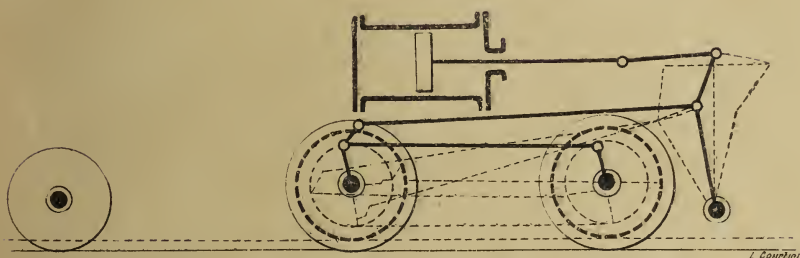


FIG. 13.

Ces machines ont une marche plus régulière que les machines à une seule roue dentée; mais la répartition des charges est plus délicate et le réglage des ressorts de suspension est plus difficile.

LOCOMOTIVES A TROIS ROUES DENTÉES

Ces machines ne sont employées à notre connaissance qu'au chemin de Manitou au Pikes-Peak.

Les deux essieux porteurs sont situés à chaque extrémité de la machine; entre eux se placent les trois roues dentées; deux sont mues par un pignon calé sur l'arbre intermédiaire, la première dans le sens de la marche est accouplée par une bielle avec la seconde.

Ce système ne s'est pas répandu; les machines à trois roues dentées sont plus lourdes et plus chères que les autres, et l'on comprend sans peine que s'il est difficile d'obtenir un engrènement convenable avec deux roues dentées, les difficultés sont bien plus grandes pour trois roues.

LOCOMOTIVES ÉLECTRIQUES.

D'après MM. Blondel et Dubois, la traction électrique sur une ligne à crémaillère remonte à 1887 ; elle fut employée pour franchir une rampe de 60 à 100 millimètres dans les rues de Pittsburg.

Les avantages de la traction électrique sont les suivants :

1° Faible poids par cheval des moteurs électriques, réduisant le poids mort à la dernière limite.

2° Facilité de transmission du mouvement et de réglage de la vitesse.

3° Faible place occupée par les moteurs électriques.

4° Freinage sûr et énergique.

A moins qu'il ne s'agisse de trains lourds ou d'efforts considérables, il est naturellement tout indiqué de ne pas faire usage de locomotives séparées, mais bien de voitures automobiles ; c'est la solution adoptée autant que possible. Nous nous occuperons ici des moteurs actionnant exclusivement les roues dentées ; les roues porteuses ne concourant pas à la propulsion.

Les locomoteurs électriques sont actionnés par des courants continus ou alternatifs dont la tension varie de 450 à 750 volts ; la ligne électrique est généralement aérienne et les rails de roulement et la crémaillère peuvent être utilisés conjointement comme conducteurs de retour.

Au point de vue de l'installation des moteurs et de la transmission du mouvement de la dynamo à la roue dentée, la difficulté suivante se présente : c'est qu'il faut laisser entre l'arbre du moteur et celui de la roue dentée une distance assez

grande pour que cette dernière ne vienne pas choquer l'enveloppe de la dynamo ; ce qui oblige à recourir à une double réduction.

A cet effet, l'arbre de la dynamo attaque un faux essieu placé au-dessus de lui et ce faux essieu conduit à son tour l'arbre de la roue dentée placé

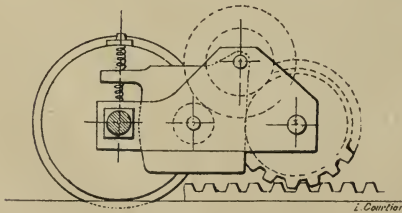


FIG. 14.

dans le même plan horizontal que l'arbre de la dynamo ; les centres des trois arbres forment ainsi un triangle dont la base

est horizontale. Cette disposition est appliquée comme l'indique la figure 14 aux voitures automobiles du Mont Salève.

On peut aussi, pour gagner de la place, monter le pignon de la crémaillère et la roue dentée sur un arbre creux enfilé sur l'essieu porteur.

Il convient de remarquer que dans tous les cas la roue dentée doit être suspendue plus ou moins directement par l'intermédiaire des ressorts afin d'éviter des ruptures de la dent.

En employant deux moteurs montés chacun sur bogies, on obtient la puissance voulue pour la propulsion des véhicules automobiles.

Pour les locomotives électriques, on place les dynamos au-dessus du châssis en raison de la place occupée par les roues dentées.

FREINAGE.

Les locomotives électriques sont munies des freins ci-dessous indiqués :

1° Freins à crémaillère, dans lesquels des freins de friction agissent sur des poulies clavetées sur l'axe de la roue dentée ou sur une roue dentée spéciale ;

2° Freins à sabot, agissant sur les roues porteuses.

3° Freins automatiques, agissant dès que la vitesse dépasse un certain maximum. Ces freins sont généralement en connexion avec un commutateur qui coupe le courant dès que la vitesse dépasse le maximum fixé.

L'emploi des moteurs asynchrones donne des moyens extrêmement commodes et sûrs de réglage de la vitesse à la descente. On peut en effet :

1° Laisser les mêmes connexions qu'à la montée et régler par les résistances jusqu'à obtenir la vitesse voulue.

2° Laisser en court-circuit les inducts qui travaillent au-dessus du synchronisme et renvoient du courant à l'usine.

La récupération a lieu ainsi automatiquement, dès que la machine atteint une vitesse supérieure de 2 à 3% à celle du synchronisme.

5° FREINS ÉLECTRIQUES.

Nous décrirons à titre d'exemple la locomotive du chemin de la Jungfrau, très analogue à celle de la ligne du Vésuve et du Gornergratt.

LOCOMOTIVE DE LA JUNGFRAU.

La machine du chemin de la Jungfrau porte sur deux essieux distants de 2,30 m. Les roues dentées au nombre de deux engrennent avec une crémaillère Strub, elles sont calées sur un arbre distinct. Un moteur électrique actionne chacune de ces roues par une transmission à double réduction de vitesse. Les roues d'un diamètre de 0,70 m sont distantes de 1,16 m.

Les moteurs électriques asynchrones triphasés de la force de 125 chevaux tournent à 800 tours par minute, en recevant un courant triphasé de 235 ampères sous 500 volts; la locomotive pèse 12 t et peut développer un effort de traction de 6.600 kg, elle pousse un train de 2 voitures pesant ensemble 14 t; chaque voiture contenant 70 personnes; la vitesse de marche en rampe de 250 mm est de 8 km.

Trois freins assurent l'arrêt ou le ralentissement du train :

1° Un frein à main comportant le frein ordinaire de friction monté sur l'arbre des pignons de crémaillères.

2° Un frein à mâchoire embrassant le champignon supérieur du rail de la crémaillère Strub actionné par le machiniste, ou automatiquement en cas d'interruption de courant.

3° Un frein à commande électrique monté sur l'arbre des dynamos et automatique. L'action de ce frein est entravée par un solénoïde, tant que le courant électrique passe; il fonctionne par conséquent dès que le courant est interrompu, ce qui arrive automatiquement en particulier dès que la vitesse dépasse une certaine limite; en outre, ce frein peut être actionné à la main d'un point quelconque du train.

Aucun frein n'est monté sur les voitures.

VOITURE AUTOMOBILE DU TRAMWAY ÉLECTRIQUE DE BARMEN.

Ces voitures ont la forme des voitures ordinaires de tramway avec plates-forme saux extrémités. Les deux essieux portant l'un et l'autre une roue dentée motrice sont actionnés chacun par un moteur indépendant de 60 chevaux excité en dérivation.

Sur chaque essieux sont montés les freins de friction ordinaires mus à volonté de l'une ou l'autre plate-forme.

D'autre part, dès que la vitesse dépasse 3,20 m par seconde (environ 11,5 km à l'heure), un régulateur à force centrifuge fait déclencher un ressort serrant le frein automatique.

En outre, des coins en fonte peuvent être placés sur le rail en avant des roues porteuses, pour parer au cas où les roues dentées s'échapperaient de la crémaillère. Enfin, un frein électrique permet de régler la vitesse sur les pentes, il a l'avantage de récupérer une partie du travail de la gravité.

Les voitures pèsent 9 t à vide, elle offrent 16 places assises et 4 debout, leur longueur est de 8 m., la vitesse de marche en palier est de 9 km à l'heure.

Le tramway de Barmen est comme nous l'avons dit établi sur une route ordinaire; il a été installé par la maison Siemens et Halske; l'ouverture à l'exploitation a eu lieu en 1904.

VOITURE AUTOMOBILE DU MONT-SALÈVE.

Cette automobile qui remonte à 1902 est le premier cas d'application du moteur électrique à la traction en crémaillère.

Les voitures, longues de 8,510 m entre tampons reposent sur trois essieux dont les roues porteuses sont folles, l'adhérence n'étant pas utilisée pour la traction.

Les deux roues dentées motrices sont calées sur des faux essieux attaqués par l'intermédiaire d'engrenages par un moteur Thury à double réduction de vitesse. Chacun de ces moteurs développe normalement 30 ch, à la vitesse de 1.200 tours; la réduction totale de vitesse est de 1/14. La transmission de mouvement comprend 6 arbres; ce qui est assez compliqué.

Les moteurs seuls pèsent 2,6 t et 6 t avec les transmissions et batis, soit 100 kg par cheval, ce qui est un poids élevé pour un moteur électrique. Le poids de la voiture vide est de 10,4 t.

LOCOMOTIVES INDUSTRIELLES DE L'UNION ELEKTRICITÄTS GESELLSCHAFT.

Cette Société a construit, pour des voies industrielles à pente raide, des locomotives destinées à la desserte d'usines, mines, etc.

Nous citerons en particulier une locomotive pour voie de 0,60 m, d'une puissance de 35 ch, pesant 3,5 t.

Elle comporte 2 moteurs à double réduction, attaquant par l'intermédiaire d'un train d'engrenages un faux essieu sur lequel sont calés les pignons conduisant la roue dentée motrice et les essieux porteurs, dont l'adhérence est utilisée pour la propulsion.

La vitesse en palier atteint 2 m par seconde.

2^e Classe. — Machines mixtes

MACHINES MIXTES A UN MÉCANISME

Le principe des machines mixtes remonte à la locomotive du chemin des carrières d'OEstermündingen, construite sur les plans de Riggengbach en 1870; mais cette machine différait notablement du type actuel en ce qu'un mécanisme à débrayage permettait d'actionner à volonté le mécanisme à adhérence ou à crémaillère.

C'est en 1876 que Riggengbach construisit une véritable machine mixte pour le chemin de Wasseraalengen; en 1880 les machines du chemin de Friederichsseggen à la Lahn furent construites sur le même type, mais elles sont plus puissantes.

Les dispositions de ces machines ont été adoptées sensiblement pour la locomotive du chemin de Langres en 1887; nous allons décrire cette machine avec quelque détail.

Le principe essentiel est on s'en souvient, que le mécanisme à adhérence concourt à la propulsion, comme le mécanisme à crémaillère.

MACHINE DE LANGRES.

Avant de parler de cette machine, remarquons que pour les machines mixtes il est utile que le diamètre de contact du bandage des roues porteuses soit légèrement supérieur au diamètre primitif de la roue dentée, car si le contraire se présentait il y aurait glissement, et les roues à adhérence tendant à tourner moins vite que les roues à crémaillère, elles seraient trainées sur le rail, d'où travail négatif, ce qui ne se présente pas lorsque les roues porteuses ont un diamètre légèrement supérieur à celui du cercle primitif de la roue dentée.

La machine de Langres, dont la figure 15 montre l'élévation, est portée par deux roues de 0,773 m de diamètre, l'empattement est de 1,85 m, les cylindres extérieurs de 0,280 m de diamètre attaquent un faux essieu intermédiaire sur lequel sont calés deux pignons conduisant deux roues dentées entre lesquelles est comprise la roue dentée motrice dont le diamètre primitif est de 0,764 m.

Le diamètre primitif des pignons calés sur l'arbre auxiliaire et des roues dentées accolées à la roue dentée motrice étant respectivement 0,353 et 0,613 le rapport des vitesses est de 1,74 : à un tour de la roue dentée correspond 1,74 tour de l'arbre. Le diamètre des roues porteuses étant de 0,773, la machine avance par tour de roue de 2,428, et la vitesse normale étant de 10 km à l'heure ou 166,67 m par minute, le nombre de tours de roue par minute est $\frac{166,67}{2,428} = 69$ tours environ,

Soit pour l'arbre intermédiaire $69 \times 1,74 = 120$ tours ou 4 par seconde; bonne condition de vitesse pour le mécanisme moteur.

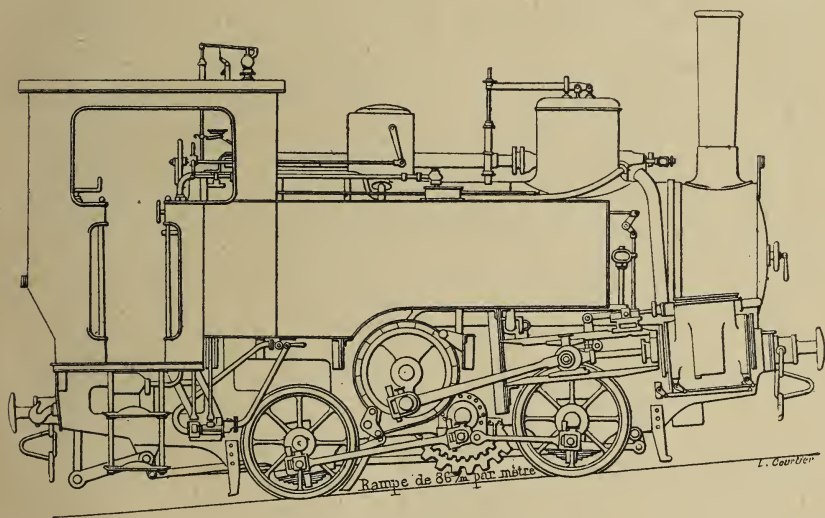


FIG. 15.

L'axe de la chaudière est incliné de 0,086 m par mètre; la surface de chauffe totale est de 36,2 m²; la surface de grille 0,76 m²; le poids à vide est de 12,4 t., en ordre de marche 15,6 t.

La machine remorque sur les rampes de 172 mm un train de 12,5 t à la vitesse de 10 km, soit un travail de 200 ch ou 5 ch par mètre carré de surface de chauffe; chiffre élevé, mais la rampe de 172 mm n'a que 230 m de longueur.

Dans les sections à adhérence, dont les déclivités maxima sont de 30 mm, l'effort limite basé sur l'adhérence est

de $\frac{24}{7} = 2.000$ kg, alors que l'effort de traction réel est inférieur à 1.100 kg.

Un frein de grue à poulie et lame flexible est monté sur le faux essieu et sert pour les arrêts normaux; en outre, des poulies de friction cannelées comprennent entre elles une roue dentée engrenant avec la crémaillère; elles sont montées sur l'essieu avant, en serrant ces poulies entre deux mâchoires on a un second frein semblable à ceux déjà décrits.

Enfin, la machine porte un frein à air comprimé système Rigenbach analogue à celui du Rigi.

Le diamètre des roues porteuses est supérieur de 9 mm au diamètre du cercle primitif de la roue dentée motrice, de façon que les glissements résultant de cette différence de diamètre se fassent dans le sens de la marche de la machine et que celle-ci s'améliore au fur et à mesure de l'usure des bandages.

Les machines du *Brünig* sont construites d'après les mêmes principes; mais elles sont plus puissantes, car elles remorquent un train de 35 t sur les déclivités de 120 mm; leur poids à vide est de 18,6 t, de 23 t en ordre de marche. La surface de chauffe est de 54,7 m², la pression à la chaudière 12 atm; leur empattement est de 2,400 m.

Les machines de *Padang Sumatra*, contruites pour la voie de 1,067 m, sont construites d'après les mêmes principes. Les roues porteuses ont un diamètre de 0,983 m, la roue dentée motrice a un diamètre de 0,975 m, le rapport de transmission est $\frac{1}{2,22}$.

Le diamètre des cylindres est de 340 mm, la course 500 mm, la pression à la chaudière 12 atm, l'empattement est de 2,80 m, le poids est à vide de 21 t, en ordre de marche de 26 t; elles remorquent un train de 60 t sur la déclivité maxima de 60 mm.

Les machines mixtes à 2 cylindres conviennent bien lorsque l'effort de traction est faible.

Mais les machines mixtes à deux mécanismes sont les plus répandues sur les chemins de fer mixtes, et doivent être préférées lorsque l'effort de traction est élevé. Nous allons les décrire.

Ces machines ont été imaginées par notre Collègue M. R. Abt et appliquées par lui pour la première fois en 1885 au chemin à voie normale de Blankenbourg à Tanne, dans le Harz, en vue de l'emploi de sa crémaillère à lame.

En 1887, M. Bissinger a combiné au chemin du Höllenthal

l'emploi d'une machine à deux mécanismes avec la crémaillère à échelons.

Comme au Harz, il s'agit ici de ligne à voie normale et de trains relativement lourds.

LOCOMOTIVES A QUATRE CYLINDRES ET UNE SEULE ROUE DENTÉE MOTRICE.

Ce type, plus récent que ceux du Harz et du Höllenthal, sur lesquels nous reviendrons, comporte essentiellement :

1° Deux cylindres extérieurs C^1 conduisant, par bielles et manivelles, l'essieu porteur du milieu, lequel est couplé avec

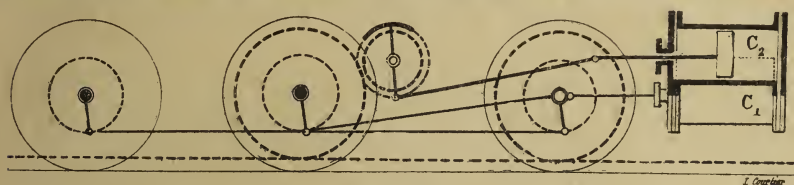


FIG. 16.

les essieux porteurs avant et arrière ; la roue dentée motrice est calée sur l'essieu médian, et sur l'essieu avant est calée une autre roue dentée ne servant que pour le freinage.

2° Deux cylindres intérieurs C^1 attaquant un faux essieu commandant par pignon la roue dentée motrice avec laquelle elle engrène directement. La figure 16 montre le schéma de cette disposition.

MACHINES DE L'OVERLAND BERNOIS.

Les machines de ce type sont utilisées à l'Oberland Bernois ; celles du Saint-Gall-Gais sont d'un type à peu près analogue. Les données principales des machines de l'Oberland Bernois sont les suivantes :

Cylindres	{	diamètre.	320 mm
à adhérence	{	course.	450
Cylindres	{	diamètre.	320 mm
à crémaillère	{	course.	400
Diamètre	{	à adhérence	915 mm
des roues	{	dentées motrices . . .	764
Rapport de la transmission			4,84
Poids à vide : 23,6 t ; en charge : 28,5 t.			

Elles remorquent à la vitesse de 9 km un train de 45 t sur les rampes de 120 mm.

Les machines du chemin routier de Saint-Gall-Gais sont à voie de 1,00 m, elles doivent pouvoir passer dans les courbes de 30 m que comporte la ligne, malgré un empattement de 6 m. A cet effet, les deux essieux d'avant sont seuls accouplés; l'essieu d'arrière, seulement porteur, est distant de 3 m de l'essieu couplé le plus voisin. Cet essieu d'arrière est muni d'un Bissel. Les mécanismes à adhérence et à crémaillère sont distincts; mais normalement, dans les sections à crémaillère où les deux mécanismes travaillent, la vapeur sortant des cylindres à adhérence qui sont extérieurs, passe dans les cylindres à crémaillère qui sont intérieurs.

Cette machine, munie des trois freins habituels, développe une puissance de 250 ch, elle remorque un poids de 57 t sur les rampes de 92 mm en courbe de 30 m. Son poids à vide est de 26 t, à charge de 32,5 t; elle pèse environ 125 kg par cheval.

Les roues couplées ont 0,80 m de diamètre, la roue à crémaillère 0,86 m. La surface de chauffe atteint 92 m²; la chaudière est timbrée à 12 kg.

Pour pouvoir passer dans les courbes de 50 m, on a dû faciliter la convergence des essieux par un dispositif spécial et permettre un léger déplacement de l'essieu portant la roue à crémaillère pour conserver à cet essieu la position radiale.

MACHINES A QUATRE CYLINDRES ET DEUX ROUES DENTÉES MOTRICES.

Les roues dentées sont mises en mouvement, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un balancier, soit par l'intermédiaire d'une roue dentée.

Les machines du premier type comportent trois essieux accouplés, mus par les cylindres extérieurs; les essieux des roues à crémaillère, situés entre l'essieu porteur d'avant et l'essieu porteur médian, sont accouplés par bielles; le plus éloigné est mù par bielles et manivelles commandées par les cylindres extérieurs.

MACHINES DE L'EISENERZ-VORDERNBERG ET BEYROUTH--DAMAS.

Les machines de l'Eisenerz-Vordernberg (Styrie, Autriche) et de Beyrouth-Damas sont de ce type.

Les premières, du poids de 43 t à vide et 57 t en charge, remorquent un train de 120 t sur une rampe de 71 mm; l'empattement est de 5 m; le diamètre des roues à adhérence de 1,05 m, celui des roues à crémaillère de 0,688 m; elles sont construites pour la voie de 1,435 m.

Les machines de Beyrouth-Damas sont un peu plus légères,

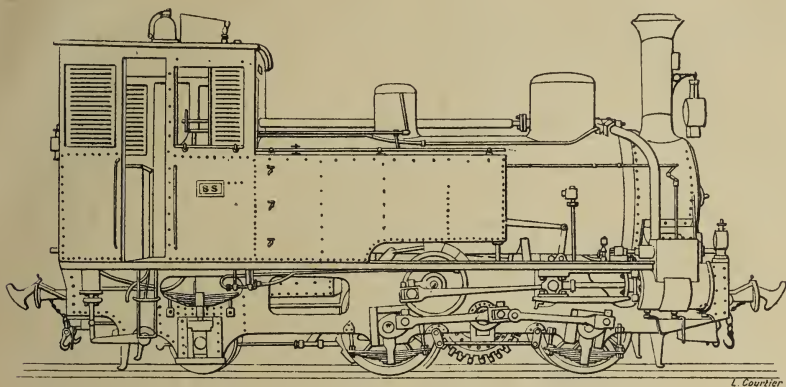


FIG. 17.

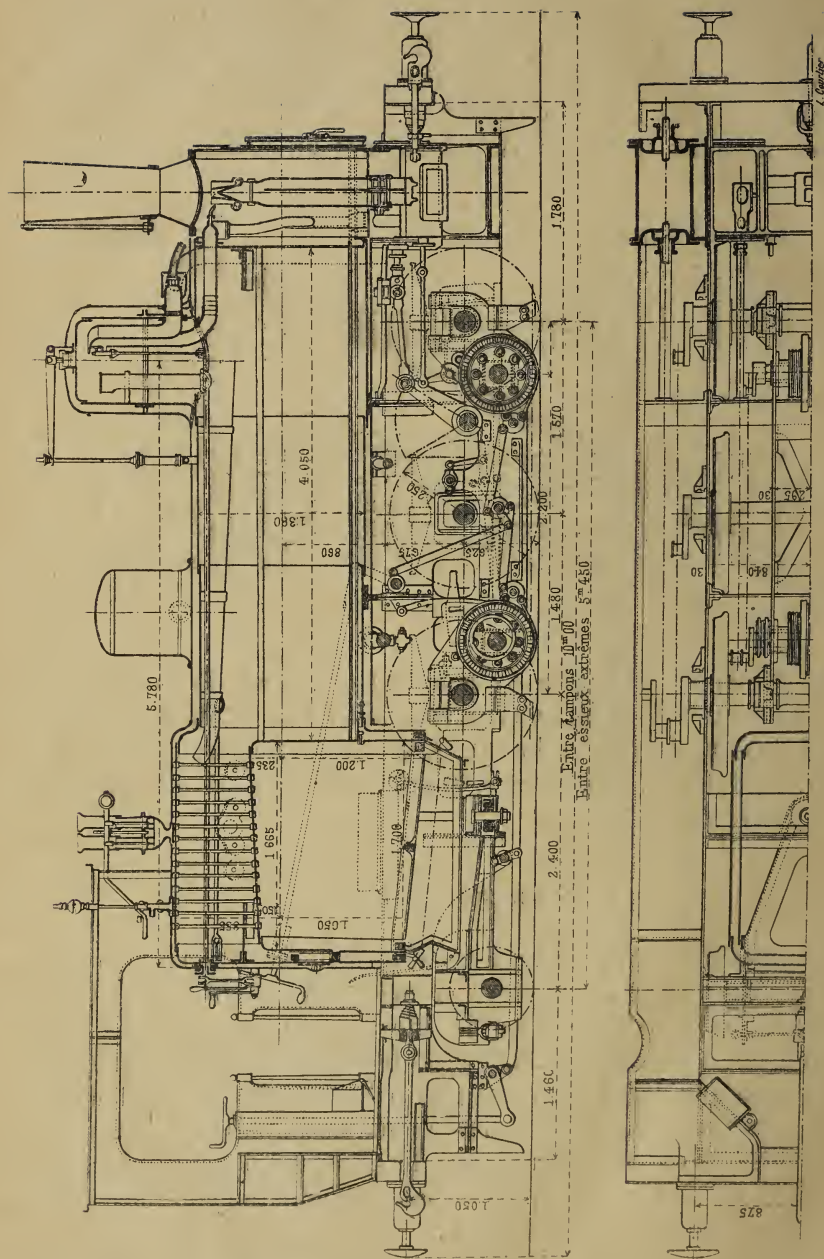
33 t à vide, 45 t en ordre de marche; elles sont faites pour la voie de 1 m; le diamètre des roues à adhérence est de 0,900 mm, celui des roues à crémaillère de 0,688 mm; elles remorquent un poids de 100 t en rampe de 0,70 mm. La figure 17 montre une vue de ces machines.

MACHINES DU HARZ.

Les machines du chemin à voie normale de Blankenbourg à Tanne, dues à M. Abt, comme nous l'avons dit, offrent un exemple de la transmission du mouvement par balancier au mécanisme à crémaillère. Ces machines-tender sont portées par quatre essieux dont trois accouplés à l'avant; les roues dentées sont installées entre chacun des essieux accouplés; l'essieu porteur libre d'arrière est muni d'un Bissel, il est distant de 2,40 m de l'essieu accouplé le plus proche; l'empattement des trois essieux accouplés est de 3,05 m.

La figure 18 montre la coupe et le plan des locomotives du Harz.

Nous avons dit que la fixation des roues dentées sur l'essieu



laissait un certain jeu dans la transmission ; la figure 19 montre cette disposition. L'essieu moteur porte un renflement sur lequel sont pratiquées des cavités. Dans chaque cavité est placé un ressort en forme d'U, dont l'un est indiqué sur la figure en R ; les extrémités de ces ressorts pénètrent dans la couronne dentée et l'entraînent, ce qui permet un certain jeu.

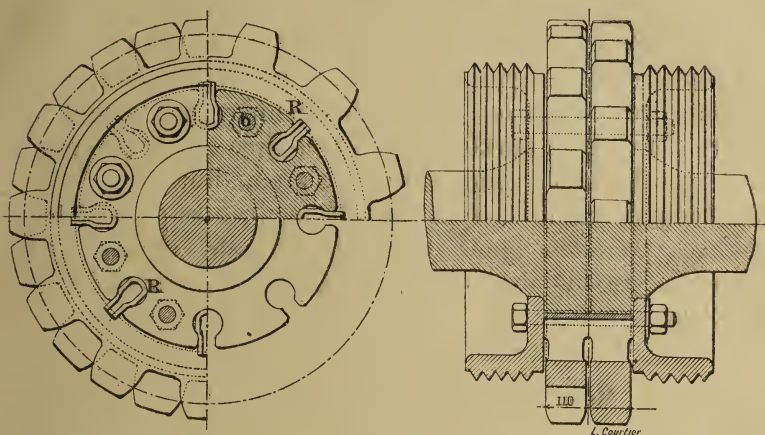


FIG. 19.

Ces machines peuvent remorquer un train de 135 t en rampe de 60 mm à la vitesse de 40 k à l'heure.

Voici leurs principales données :

Surface de chauffe	m ²	1,36
Surface de grille	m ²	1,18
Diamètre des roues à adhérence .	m	1,25
— — — à crémaillère.	m	0,573

Diamètre des cylindres.	adhérence (extérieurs)	0,450 m	course	0,400 m
	crémaillère (intérieurs)	0,300 m	—	0,600 m

Poids de la machine en service	t	55
Poids adhérent	t	47,5
Pression de la chaudière	atm	10

Comme nous l'avons dit, ces machines à quatre cylindres sont les premières du genre ; elles sont dues à notre Collègue M. Abt qui a renoncé ultérieurement à la transmission par balancier.

MACHINES DU HÖLLENTHAL.

Les machines du Höllenthal, construites par M. Bissinger, sont très analogues aux précédentes, mais un peu moins puissantes; leur poids à vide est de 34,3 t, elles ont une surface de chauffe de 84,6 m²; la machine est timbrée à 10 atm.

Ces machines remorquent un train de 100 t en rampe de 55 mm, à la vitesse de 10 km en courbe de 240 m de rayon.

Dans un troisième type de machine, les cylindres intérieurs attaquent directement les deux roues dentées, par le seul intermédiaire d'un essieu portant une roue dentée qui engrène directement avec les deux roues dentées à crémaillère.

Les locomotives de ce type ont été construites par la fabrique d'Esslingen pour les lignes de Reutlingen-Münsingen et Freudenstadt-Kloster-Reichenbach, d'après les indications de l'Ingénieur Klose.

MACHINES DE REUTLINGEN-MÜNSINGEN.

Dans ces machines, les cylindres du mécanisme à adhérence peuvent recevoir directement la vapeur de la chaudière, ou recevoir seulement la vapeur sortant des cylindres à crémaillère. Au chemin de Reutlingen-Münsingen, les dimensions des machines sont les suivantes :

Mécanisme à adhérence.	{	Diamètre des cylindres. m	0,420
		Course des pistons. m	0,612
		Diamètre des roues couplées m	1,230
Mécanisme à crémaillère.	{	Diamètre des cylindres. m	0,420
		Course m	0,540
		Diamètre de la roue à crémaillère. . m	1,082
		Rapport de la transmission	$\frac{1}{2,26}$
		Pression de la chaudière. atm	14
		Distance des roues à crémaillère . . m	1,56
Poids adhérent.			42 t
— total en service.			54 t
— à vide.			43,7 t

Locomotives électriques.

Je n'aurai à citer que deux cas d'application de locomotives électriques pour chemins mixtes.

MACHINE DE SANSSTADT-ENGELBERG.

Cette machine, portée par deux essieux, comporte une seule roue dentée motrice. Deux dynamos mettent en mouvement, par l'intermédiaire d'une transmission, la roue dentée motrice fixée sur un axe creux à travers lequel passe la manivelle, accouplée avec les deux essieux à adhérence.

Dans les sections à crémaillère, grâce à un accouplement, la roue dentée est seule mise en mouvement; les roues porteuses tournent libres sur leur essieu.

Dans les sections à adhérence, la roue dentée motrice tourne à vide.

Par conséquent, les roues à adhérence et la roue à crémaillère ne travaillent pas simultanément comme dans les locomotives à vapeur mixtes.

Les données principales de ces machines sont les suivantes :

Diamètre des roues porteuses.	0,670 mm
— à crémaillère	0,700 —
Nombre de tours de la dynamo par minute.	650
Tension du courant	750 volts
Puissance des deux dynamos	150 ch
Poids.	12 t
Effort de traction en crémaillère.	7 500 kg
— en adhérence	1 800 —

Le courant employé est le courant alternatif triphasé.

En crémaillère et déclivité de 250 mm sur 1.500 m ces locomotives poussent une voiture à voyageurs de 15 t avec une vitesse de 5 km à l'heure; en adhérence et rampe de 50 mm, deux wagons à marchandises pesant ensemble 20 t à la vitesse de 11,5 km à l'heure. Même freinage électrique qu'au Gornegratt et à la Jungfrau, moteurs travaillant en génératrice à la descente, dès que la vitesse est supérieure de 4 0/0 au synchronisme.

LOCOMOTIVES DES TRAMWAYS DE LYON A DEUX ROUES DENTÉES MOTRICES.

Ces locomotives comportent trois dynamos.

Au milieu se trouve une dynamo actionnant les roues à crémaillère; à chaque extrémité se trouve une dynamo actionnant les roues porteuses.

En adhérence, la dynamo actionnant le mécanisme à crémaillère est mise hors de circuit.

LÉGÈRETÉ SPÉCIFIQUE DES LOCOMOTIVES A CRÉMAILLÈRE. COMPARAISON AVEC LES LOCOMOTEURS ÉLECTRIQUES.

Les poids des diverses locomotives à vapeur à crémaillère ramenés au cheval-vapeur sont les suivants :

Langres	kg 97,5
Arth Rigi	103
Mont Pilate	110,6
Viège-Zermatt	118
Vitznau Rigi	136
Höllenthal.	136
Diacophtho-Kalavrita.	156

Pour les locomoteurs électriques les poids sont beaucoup moindres. Pour la première machine électrique du Mont Salève le poids à la vérité était fort, 100 kg par cheval; mais depuis, les poids ont été bien réduits. Ainsi au Vésuve, les machines du poids de 10,4 t développent un travail de 160 ch, soit 65 kg par cheval.

Au Gornergratt, les machines pesant 10,5 t développent un travail de 180 ch, soit 58 kg par cheval.

Pour les voitures automobiles du tramway de Barmen, le poids brut par cheval est de 75 kg et en réduisant la caisse, le châssis et le train de roues, seulement 45 kg. On peut donc dire qu'en moyenne le moteur électrique pèse environ moitié moins que le moteur à vapeur; avantage de première importance pour la traction en très forte rampe.

MATÉRIEL ROULANT.

Les traits caractéristiques du matériel roulant des lignes à crémaillère sont la légèreté et les appareils de freinage.

Les voitures ouvertes du Rigi sont les plus légères, leur poids ressort à 74 kg par place offerte; les voitures fermées sont beaucoup plus lourdes; ainsi les voitures à bogies avec couloir central du Viège-Zermatt pèsent 148 kg par place offerte, celles du Brünig, 195 kg; la voiture fermée à deux essieux de Langres pèse 143 kg par place offerte.

La voiture automobile à vapeur du Mont-Pilate ne pèse que 178 kg par place offerte; cette voiture, comme celle du Rigi, est seulement fermée latéralement par des rideaux.

La voiture est disposée par gradins, de façon que les sièges soient horizontaux sur la rampe de 480 mm.

Le freinage a une importance capitale comme pour les machines.

Sur les lignes à fortes pentes, tous les véhicules sont munis du frein de friction habituel, agissant sur un essieu muni d'une roue à crémaillère.

Lorsque le train se compose d'un ou deux véhicules, la manœuvre du frein se fait à la main; dans certains cas, comme nous l'avons dit, il existe des freins automatiques, par exemple au Pilate. Signalons cette particularité qu'à la Jungfrau les voitures ne sont munies d'aucun appareil de freinage.

Lorsqu'il s'agit de lignes à profil moins raide, où les trains comportent un plus grand nombre de véhicules, on emploie pour actionner le frein à crémaillère un frein automatique continu, comme au Brünig, au Viège-Zermatt et au Höllenthal; sur cette dernière ligne, on admet dans les trains des voitures non munies de freins.

CHAPITRE V

Exploitation. — Comparaison entre les lignes à adhérence et à crémaillère.

ENTRETIEN DE LA VOIE.

Pour faciliter le roulement de la roue dentée, il est d'usage de graisser les dents de la crémaillère lorsque l'on emploie la crémaillère Riggénbach. Les roues dentées des machines s'usent ainsi assez lentement, et en comptant sur une pression de 6 000 kg au contact de la roue et des échelons, comme au Rigi, on peut compter qu'une roue dentée du type de ce chemin peut fournir un trajet de 20.000 km environ.

Avec la crémaillère Abt il faut vérifier le serrage des boulons fixant la crémaillère dans les coussinets, afin d'éviter qu'ils ne travaillent au cisaillement; même précaution avec la crémaillère Strub.

La tendance au glissement longitudinal de la voie doit être combattue très énergiquement, comme nous l'avons indiqué déjà; la régularité de la division des dents de la crémaillère ne pouvant être altérée en aucune façon.

Signalons en passant les inconvénients des passages à niveau pour les chemins de fer mixtes à crémaillère surhaussée, comme celui du Brünig par exemple, où il a fallu faire à la traversée des chemins ordinaires très peu fréquentés des passages en planches analogues aux passages des brouettes dans les gares; disposition inadmissible sur une voie à circulation active.

Enfin, il ne faut pas oublier l'inconvénient déjà signalé des chutes de neige pour les crémaillères à échelons.

VITESSES DE MARCHE.

Les vitesses varient considérablement avec le profil de la ligne.

Elles sont de 4 km au Mont Pilate, de 6 km au Rigi, de 8 km à Langres, de 10 km au Harz, au Höllenthal et au Brünig, de 12 km au chemin de Padang-Sumatra.

La capacité de trafic des lignes à crémaillère se ressent forcément de la faible vitesse de marche et de la réduction des charges.

TRAFFIC.

Il est cependant intéressant de constater que, sur une ligne aussi escarpée que celle du Mont-Pilate, on transporte environ 40 000 personnes par an. 34 000 au Gornergratt. Au Vitznau-Rigi, de mai à octobre, environ 120 000; et, circonstance intéressante, sur cette dernière ligne le nombre des voyageurs est sensiblement le même à la montée et à la descente.

Au Brünig, on transporte environ 150 000 personnes par an.

Les charges remorquées varient nécessairement beaucoup : au Harz en rampe de 60 mm, en remorque 120 à 135 t. Au chemin de Prétoria à Lourenço-Marquez (Central South Africa R. R.), des machines de 133,7 m² de surface de chauffe remorquent un train de 350 t en rampe de 50 mm; c'est à notre connaissance la plus forte charge remorquée sur une ligne à crémaillère. Au Brünig, en rampe de 120 mm on remorque 30 à 40 t.

Les lignes à crémaillères sont toutes à voie unique et le nombre des trains est par suite limité par les croisements.

Sur les lignes de touristes, comme celle du Pilate, où les voyageurs se présentent par à-coup, on fait partir les voitures par séries de 2 ou 3 pour perdre le moins de temps possible au seul croisement intermédiaire de la ligne.

DÉPENSES D'EXPLOITATION.

Les frais d'exploitations sont forcément élevés sur les lignes à crémaillère; voici à ce sujet les chiffres indiqués par M. R. Abt pour les lignes du Brünig, du Pilate, du Rigi, des Rochers-de-Naye et de Viège-Zermatt pour l'année 1896.

	PILATE	RIGI	GLION NAYE	BRÜNIG	VIÈGE- ZERMATT
Capital de 1 ^{er} établis- sement	2.850.000	2.239.000	2.700.000	6.400.000	5.800.000
Par kilomètre . .	663.000	530.000	350.000	410.000	165.000
Recettes par km. .	39.675	58.148	21.043	13.569	12.855
Dépenses par km .	23.259	39.551	10.222	8.499	4.592
Produit net . . .	3,45	5,81	5,32	4,60	5,19

La ligne de Padang-Sumatra offre un exemple très intéressant de l'application des chemins à crémaillère pour un tonnage d'une certaine importance.

La longueur du réseau est de 210 km dont 36 en crémaillère.

D'après les chiffres indiqués par M. Moreau dans sa mémoire inséré au *Bulletin* de la Société de décembre 1901, les dépenses kilométriques de l'exploitation se sont élevées à 6468 f en 1876 et 7114 f en 1900.

Pour cette dernière année les dépenses kilométriques se décomposaient ainsi :

Frais généraux, Direction . . .	Fr. 1.115
Entretien de la voie et bâtiments . .	993
Matériel et traction	4.087
Exploitation.	919
TOTAL	Fr. 7.114

Les dépenses de traction représentent 57 0/0 des dépenses totales.

TARIFS

Les tarifs des lignes à crémaillère doivent tenir compte et tiennent compte en effet, non seulement de la distance horizontale parcourue, mais surtout de la hauteur gravie.

Au Brünig le kilomètre se paye 0,15 f, au Vitznau-Rigi 0,75 f au Mont Pilate 1,777 f, à la Jungfrau 2 f Il est clair que l'exploitant doit tenir compte, dans l'établissement des tarifs, de tous les éléments en jeu et, en particulier pour les lignes de plaisance en haute montagne, de la durée de la période d'ouverture possible.

COMPARAISON ENTRE LES LIGNES A CRÉMAILLÈRE ET A ADHÉRENCE.

Il faut le dire de suite, cette comparaison n'a d'intérêt et ne doit être faite que pour les lignes mixtes, les seules pour lesquelles on peut hésiter entre une ligne à adhérence et une ligne à crémaillère. Tel était le cas pour les chemins du Höllenthal, du Harz, de Viège-Zermatt, du Brünig, et plus récemment du Fayet-Saint-Gervais à Chamonix.

Si l'emploi des machines compound permet d'aborder par

simple adhérence des rampes de 40 à 45 mm, la traction électrique et l'emploi des véhicules automobiles, poussant à l'extrême la légèreté spécifique du moteur, permettent de franchir assez couramment des rampes de 90 mm, et ont pour conséquence de restreindre les cas d'application de la crémaillère.

Le tramway de Laon offre à cet égard un exemple particulièrement intéressant; la crémaillère n'est pas utilisée en effet à la montée des rampes de 113 mm et 122 mm qui règnent respectivement sur 114 et 152 m; ces rampes sont franchies par simple adhérence par les voitures automobiles; mais par contre le frein à crémaillère est une garantie à la descente, les freins à sabot pouvant ne plus donner une sécurité suffisante.

Nous citerons cependant l'exemple des tramways électriques de Boulogne-sur-Mer qui gravissent une rue en déclivité de près de 120 mm, sans inconvénients aussi bien à la montée qu'à la descente.

Toutefois il ne faut pas oublier que, lorsque l'on s'approche de la limite d'adhérence, la question de la sécurité de la descente est en jeu et qu'à ce point de vue la crémaillère donne une sécurité incomparable.

Au Viège-Zermatt l'adoption de la crémaillère a permis de réaliser une diminution de longueur de 500 m, ce qui est peu; mais par contre, une réduction de dépense de 500000 f sur un tracé à adhérence.

Au chemin du Harz, les dépenses d'établissement, évaluées à 45000000 f ont été réduites à 8000000 f pour le tracé à crémaillère.

Le chemin à crémaillère du Harz, exécuté dans un pays très accidenté, a coûté 130700 f par kilomètre.

Au Saint-Gall-Gais, la dépense kilométrique de l'établissement s'est élevée à 137627 f par kilomètre; elle a été au Brünig de 144.800 francs.

Dans ces dépenses, la crémaillère entre pour 30000 ou 40000 f par kilomètre; avec le matériel roulant on peut compter 45000 f de plus que pour une ligne à adhérence, dans des conditions identiques au point de vue de l'infrastructure.

Les chemins à crémaillère, en résumé, permettent de réaliser au point de vue des dépenses de premier établissement :

1° Une réduction de la longueur à construire;

2° Une diminution dans l'importance des ouvrages d'art parce qu'ils suivent de plus près les formes du terrain.

Par contre leur exploitation est plus onéreuse et leur capacité de trafic plus restreinte.

Une étude détaillée et comparative peut seule dans chaque cas déterminer le parti à prendre.

Si restreint que puisse paraître a première vue le champ d'application des chemins à crémaillère, on reconnaîtra cependant qu'ils ont donné dans le passé et donneront encore dans l'avenir le moyen de doter de voies ferrées des régions montagneuses que les lignes à adhérence auraient pu difficilement aborder. Cette œuvre est grande et éminemment utile; elle suffira pour faire vivre longtemps dans le souvenir des Ingénieurs les noms de Riggenbach et de Roman Abt et nous devons nous féliciter de voir la Société des Ingénieurs Civils de France compter parmi elle des hommes qui ont rendu de semblables services à la science de l'Ingénieur, qui ont contribué à répandre les voies ferrées dans les régions où la nature avait accumulé les difficultés et permis à tout être humain l'ascension des plus hauts sommets de la chaîne des Alpes.

OUVRAGES A CONSULTER

- R. ABT : *Die drei Rigi-Bahnen*. Zurich, 1877.
- R. et S. ABT : *Der Eisenbahnbau-Lokomotiv-Steilbahnen und Seilbahnen*. Leipzig, 1901.
- BLONDEL et DUBOIS : *La Traction Électrique*, tome II. Paris, Béranger, 1901.
- BLUM, von BORRIES et BARKHAUSEN : *Die Eisenbahn Technik, die Zahnbahnen*. Wiesbaden, 1905.
- BRUCKMANN : *Neure Zahnradbahnen-Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*, volume 142.
- ENGINEERING : *Chemin de fer de Padang-Sumatra*, 19 avril et 10 mai 1895, 3 septembre 1897. *Chemin de fer de Snowdon*, 3, 10 et 17 avril 1896. *Chemin de fer du Nilgiri*, 16 septembre 1898.
- S. HERZOG : *Die Jungfraubahn*. Zurich, 1904.
- LÉVY-LAMBERT : *Les Chemins de fer à crémaillère*. Paris, 1892.
- KOPPE : *Interessantesten Alpen und Bergbahnen vornehmlich der Schweiz*. Berlin, 1896.
- MALLET : *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils. Effet utile des Locomotives*, février 1896, page 248.
- MARTIN et CLARARD : *Monographie du Chemin de fer de Saint-Gall-Gais*. Paris, Baudry, 1891.
- Revue générale des Chemins de fer*, 1^{er} janvier 1899.— R. GODFERNAUX : *Le Chemin de fer de la Jungfrau*.
- BOURQUELOT : *Chemin de fer électrique de Laon*, octobre 1899.
- Zweizerische Bauzeitung*, volume 33. — 1899. *Die Elektrische Bahn Stansstad-Engelberg* volume 31.
- Die Elektrische Zahnradbahn auf der Gornergratt*. Zurich, 1903.
-

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE PREMIER. — Considérations générales. — Historique	507
De l'adhérence. Valeurs supérieures et inférieures.	508
Diminution de l'effet utile des locomotives en forte rampe; limite de charge résultant de la valeur de l'adhérence, limite résultant de la légèreté spécifique du moteur; exemples numériques de charges trainées en fortes rampes sur des lignes à adhérence et à crémaillère.	509
Principe des chemins à crémaillère	510
Principe des divers types de crémaillère, chemins entièrement à crémaillère et chemins de fer mixtes.	512
 CHAPITRE II. — Tracé des chemins à crémaillère.	 512
Description de tracés	513
1° Chemins entièrement à crémaillère	513
Chemins de la Jungfrau et du Gornergratt	516
2° Chemins de fer mixtes.	517
Chemins de l'Oberland bernois	517
Limites inférieure et supérieure des déclivités	518
Rayon minimum des courbes.	518
 CHAPITRE III. — Voie et crémaillère. Types divers de crémaillère	 519
Particularités des voies à crémaillère	519
Poussée longitudinale de la crémaillère	520
Consolidation de la voie, ancrages	520
Crémaillère Riggerbach	521
Disposition, dimensions, constructions, poids, tracé des dents	521
Types à ailes symétriques et dissymétriques, exemples	522
Type surélevé du Brünig	523
Type de Trait Planche	523
Types Bissinger et Klose; exemples divers	524
Inconvénients des crémaillères type Riggerbach et dérivés.	524
Crémaillère Abt, principe; crémaillères à 1, 2 et 3 lames, dimensions, poids, tracé des dents, avantages comparatifs relativement aux types précédents	526
Crémaillère Strub, profil, construction, poids, avantages comparatifs relativement aux types précédents.	528
Crémaillère Locher, principe, profil, applications en très forte rampe, type du Mont-Pilate	530
Pièce d'entrée de la crémaillère des chemins de fer mixtes	533
Prix de revient de la crémaillère	535

CHAPITRE IV. — Machines et matériel roulant. — Traction électrique. 535

Locomotives à système simple et mixte.	536
Machines à 1 et 2 mécanismes moteurs.	536
Locomotives à 1, 2 et 3 roues dentées	539
Types de Vitznau-Rigi, d'Arth-Rigi, du Schneeberg, de Manitou au Pikes-Peak pour lignes entièrement à crémaillère	539
Locomotives électriques, dispositions générales: freinage, locomotive de la Jung- frau. Voiture du tramway de Barmen. Automobile du Mont-Salève. Locomotives de l'Elektricitäts Gesellschaft	541
Machines des chemins mixtes.	544
Machines à 1 mécanisme: Langres, Brünig, Padang-Sumatra.	544
Machines à 2 mécanismes: Oberland Bernois, Eisernerz-Vordenberg, Beyrouth- Damas, Blankenbourg à Tanne, Höllenthal, Reutlingen-Münsingen.	547
Locomotives électriques du chemin mixte de Stansstadt-Engelberg.	553
Matériel roulant.	555
Voitures du Rigi, de Viège-Zermatt, du Brünig, du Mont-Pilate, de la Jungfrau.	555
Dimensions, poids, légèreté spécifique	555

CHAPITRE V. — Exploitation 556

Entretien de la voie et du matériel, graissage de la crémaillère, vitesse de marche.	556
Trafic	557
Dépenses d'exploitation, dépenses de traction.	557
Tarifs de diverses lignes. Recettes	558
Comparaisons entre les lignes à adhérence et à crémaillère	558
Ouvrages à consulter.	561



3 0112 062191223

NOTICE NÉCROLOGIQUE

SUR

Édouard SIMON

PAR

M. A. MALLET

La Société des Ingénieurs Civils de France a éprouvé, au cours de l'année dernière, une perte très sensible dans la personne d'un de ses membres les plus dévoués, Édouard Simon.

Dans la séance du 19 mars 1905, notre Président, M. Coiseau, annonçait en termes émus le décès de notre Collègue, dont la vie et les travaux devaient être retracés dans une notice insérée au Bulletin de la Société. Diverses circonstances ont retardé, malheureusement, jusqu'ici la publication de cette notice. On peut affirmer que, pour être un peu tardif, le témoignage de regret et d'estime que la Société donne ici, par notre voix, à cet Ingénieur distingué, n'en est pas moins sincère.

Édouard Simon était né en 1840, à Elbeuf-sur-Seine, où son père exploitait une fabrique de drap ; il était le dernier de trois fils, dont le second mourut très jeune et dont l'ainé, qui succéda à son père, est encore vivant. Celui qui écrit ces lignes eut les jeunes Simon pour voisins et camarades d'enfance et saisit avec empressement l'occasion de donner à celui qui devint notre Collègue, cette suprême marque de sympathie.

Édouard Simon, après avoir achevé ses études à Paris, fit son apprentissage industriel sous les auspices de Michel Alcan, beau-frère de sa mère ; il était à bonne école pour s'initier aux détails des diverses branches de la grande industrie textile dans laquelle notre ancien Président s'était acquis, à si juste titre, une notoriété considérable.

Après le stage nécessaire dans le bureau d'Ingénieur de son oncle, Simon entra dans la pratique en passant successivement dans plusieurs filatures ou fabriques de tissus, en qualité d'Ingénieur d'abord, puis de directeur ensuite et acquit, dans ces diverses fonctions, une expérience consommée qui lui permit d'apporter de sérieux perfectionnements à plusieurs machines